

# Tien perustamistavan valinta

TIEGEOTEKNIIKAN KÄSIKIRJA





# Tien perustamistavan valinta

Tiegeotekniikan käsikirja

Liikenneviraston oppaita 2/2014

Liikennevirasto  
Helsinki 2014

*Kannen kuva: Jouni Saaristo*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6591

ISSN 1798-6605

ISBN 978-952-255-411-6

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Tietekninen yksikkö / Väylänpito

ELY-keskukset, Liikenne- ja infrastruktuuri - vastualueet  
Liikenneviraston Toiminnan ohjaus, Hankkeet ja Väylänpito – toimialat

Asiasanat: pohjarakenteet, pohjarakennus, geotekniikka, pehmeiöt, penkereet luiskat, esisuunnitelmat, yleis-  
suunnitelmat, tiesuunnitelmat, rakennussuunnitelmat

### Tien perustamistavan valinta, tiegeotekniikan käsikirja

Tämä käsikirja on julkaistu Liikenneviraston oppaita -sarjassa ja on tarkoitettu hyödynnettäväksi maanteiden pohjarakennusmenetelmän valinnassa eri suunnittelu- ja rakentamisvaiheissa. Käsikirjan ohjeet edustavat hyvää suunnittelutapaa mutta koska julkaisu on oppikirjamainen, sitä ei voida liittää sopimusasiakirjoihin velvoittavaksi ohjeeksi. Käsikirjaa voidaan hyödyntää Liikenneviraston ohjeistuksen ohella hankekohtaisia suunnitteluperusteita ja laatuvaatimuksia laadittaessa. Opas on kirjoitettu uudistaen vuonna 2003 julkaistua mutta myöhemmin kumotua Tiehallinnon ohjejulkaisua Tien perustamistavan valinta, TIEH 2100019-03.

Käsikirjassa esitetään pehmeiköille rakennettavien tiepenkereiden ja tieleikkausten pohjanvahvistusten ja pohjarakenteiden sekä luiskanvahvistusten ja tukirakenteiden valinnassa huomioonotettavia tekijöitä. Ohjeessa on pyritty tuomaan esille tämän hetkinen tiivistetty tieto elinkaarikustannusten laskennassa vaikuttavista asioista.

Tässä julkaisussa käsitellään vain maanteiden suunnittelua ja mitoitusta. Muiden teiden ja väylien suunnittelussa ohjetta voidaan käyttää soveltuvin osin.

Yksikön päällikkö  
Tietekninen yksikkö

Geoasiantuntija  
Tietekninen yksikkö



Kari Lehtonen



Pentti Salo

LISÄTIETOJA: Veli-Matti Uotinen  
Liikennevirasto, Väylänpito

31.1.2014

## OPAS SAATAVISSA LIIKENNEVIRASTON NETTISIVULTA OSOITTEESTA

[www.liikennevirasto.fi/ohjeluettelo](http://www.liikennevirasto.fi/ohjeluettelo)

## Kuvailulehti TIEDOKSI

Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL

Rakennusteollisuus RT

Infra ry

Suomen Kuntaliitto

Tekniset yliopistot/korkeakoulut ja ammattikorkeakoulut

VTT

G10 -kaupungit

Tie- ja geokonsultit

Ohjeen laatijat ja työhön osallistuneet asiantuntijat

Liikenneviraston toiminnan ohjaus, hankkeet ja väylänpitotoimialojen osastot

Liikenneviraston kirjasto

Suunnittelu, projektien toteutus, kunnossapito sekä infra ja ympäristö -osastojen yksiköt

Liikenneviraston ja ELY-keskusten geoasiantuntijat

## Esipuhe

Oppaan kirjoitti Antti Junnila Innogeo Oy:stä. Opas laadittiin uudistaen vuonna 2003 valmistunutta mutta myöhemmin kumottua Tiehallinnon ohjetta TIEH 2100019-v-03 Tien perustamistavan valinta. Oppaasta on tehty käsikirjamainen ja entiseen ohjeeseen verrattuna julkaisua on päivitetty ja täydennetty mm leventämiskäytös- ja pohjatutkimusten osalta. Tilaajan puolelta työtä valvoi Pentti Salo. Tiina Perttula osallistui leventämiskohteiden parantamistapojen ohjeistuksen ideointiin ja kommentoitiin.

Helsingissä helmikuussa 2014

Liikennevirasto  
Väylänpito/Tietekninen yksikkö

## Sisältö

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1      | JOHDANTO .....   | 8  |
| 1.1    | Oppaan tarkoitus ja sisältö .....                                    | 8  |
| 1.2    | Oppaan liittyminen ohjeisiin ja muihin julkaisuihin .....            | 8  |
| 1.3    | Suunnitteluvaiheet ja oppaan soveltaminen .....                      | 8  |
| 2      | POHJARAKENNUMENETELMÄN VALINTATUTKIMUKSET .....                      | 10 |
| 2.1    | Orientoivat tutkimukset .....  | 10 |
| 2.2    | Maakerrosrajojen ja maanpinnan muotojen selvittäminen .....          | 10 |
| 2.3    | Pehmeiden kerrosten lujuustutkimukset .....                          | 15 |
| 2.4    | Painumaominaisuuksien selvittäminen .....                            | 16 |
| 2.5    | Pohjatutkimukset nykyisen tien kohdalla .....                        | 17 |
| 2.6    | Ympäristöön kohdistuvat tutkimukset .....                            | 19 |
| 3      | POHJANVAHVISTUS- JA PERUSTAMISTAPAMENETELMÄT .....                   | 20 |
| 3.1    | Penkereiden perustamistavat.....                                     | 20 |
| 3.1.1  | Perustamistavan valinnan tavoitteet .....                            | 20 |
| 3.1.2  | Maanvarainen penger, vastapenger, esikuormitus.....                  | 20 |
| 3.1.3  | Pystyjoitus.....   | 22 |
| 3.1.4  | Pengerkevennys .....   | 24 |
| 3.1.5  | Lujitteet ja telat.....  | 26 |
| 3.1.6  | Massanvaihto.....  | 27 |
| 3.1.7  | Syvästabilointi .....  | 29 |
| 3.1.8  | Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet .....                            | 32 |
| 3.1.9  | Pehmeikkösillat.....   | 34 |
| 3.1.10 | Ratkaisujen yhdistelmät.....   | 34 |
| 3.1.11 | Meluvallien perustamistavat .....                                    | 35 |
| 3.2    | Painumatarkastelut .....   | 35 |
| 3.2.1  | Painumatarkastelut ratkaisun valintaa varten .....                   | 35 |
| 3.2.2  | Painumatarkastelujen riippuvuus pohjasuhteista .....                 | 37 |
| 3.2.3  | Eri tavoilla perustettavien penkereiden painumien vertailu.....      | 37 |
| 3.3    | Tiepenkereen levennyksen perustamistavan valinta .....               | 38 |
| 3.3.1  | Yleistä .....  | 38 |
| 3.3.2  | Maanvaraisen penkereen leventäminen .....                            | 39 |
| 3.3.3  | Kevennetyn penkereen leventäminen.....                               | 42 |
| 3.3.4  | Pystyjoitusta käyttäen perustetun penkereen leventäminen .....       | 42 |
| 3.3.5  | Lujitteita käyttäen perustetun penkereen leventäminen .....          | 42 |
| 3.3.6  | Massanvaihdolle perustetun penkereen leventäminen .....              | 42 |
| 3.3.7  | Syvästabiloinnille perustetun penkereen leventäminen .....           | 43 |
| 3.3.8  | Paaluhatturakennetta käyttäen perustetun penkereen leventäminen..... | 43 |
| 3.3.9  | Paalulaattaa käyttäen perustetun penkereen leventäminen .....        | 43 |
| 3.4    | Leikkausten vahvistamismenetelmät.....                               | 43 |
| 3.4.1  | Vahvistamismenetelmän valinnan tavoitteet.....                       | 43 |
| 3.4.2  | Luiskan kaltevuuden valinta .....                                    | 44 |
| 3.4.3  | Kevennysleikkaus .....   | 45 |
| 3.4.4  | Massanvaihto luiskassa.....  | 46 |
| 3.4.5  | Tukiseinärakenteet.....  | 46 |
| 3.4.6  | Syvästabilointi luiskanvahvistuksena.....                            | 48 |
| 3.4.7  | Luiskapaalutus .....   | 49 |
| 3.4.8  | Tukimuurit ja kaukalot.....  | 49 |



---

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.4.9   | Luiskanvahvistusmenetelmien yhdistelmät .....  | 50 |
| 3.5     | Pohjavedenalennus.....   | 50 |
| 4       | RATKAISUN VALINTA ELINKAARIKUSTANNUSTEN PERUSTEELLA JA HUOMIOONOTETTAVAT TEKIJÄT .....         | 51 |
| 4.1     | Tekniset vaatimukset.....  | 51 |
| 4.2     | Laatutasotavoitteen valinta.....   | 51 |
| 4.3     | Rakentamiskustannukset.....  | 51 |
| 4.4     | Ylläpitokustannukset .....   | 52 |
| 4.5     | Ympäristövaikutukset ja ympäristökuormitukset .....  | 53 |
| 4.6     | Pohjarakenteiden pitkäaikaiskestävyys .....  | 54 |
| 4.7     | Pohjarakennustyön onnistumisvarmuus.....   | 56 |
| 4.8     | Muut tekijät.....  | 56 |
| 4.8.1   | Tilantarve .....   | 56 |
| 4.8.2   | Tarvittava rakentamisaika .....  | 56 |
| 4.8.3   | Työnaikainen liikenne.....   | 57 |
| 4.8.4   | Tulevat rakentamisvaiheet .....  | 57 |
| 4.8.5   | Tien käyttäjän kustannukset .....  | 58 |
| 4.9     | Vaihtoehtojen karsiminen ja valikointi.....  | 58 |
| 4.9.1   | Pohjasuhteet, tiegeometria ja pakkopisteet.....  | 58 |
| 4.9.2   | Painumastandardi .....   | 60 |
| 4.9.3   | Kirjavuuden vähentäminen.....  | 60 |
| 4.10    | Ratkaisun valinta elinkaarikustannusten perusteella .....                                      | 61 |
| 5       | POHJARAKENNUSRATKAISUN VALINTA ERI VAIHEISSA.....  | 62 |
| 5.1     | Esisuunnitteluvaiheet.....   | 62 |
| 5.2     | Tiesuunnitelmavaihe .....  | 63 |
| 5.3     | Rakennussuunnitteluvaihe .....   | 64 |
| 5.4     | Sopimusmuotojen vaikutus ratkaisun valintaan .....   | 64 |
|         | KIRJALLISUUS .....   | 65 |
|         | LIITTEET   |    |
| Liite 1 | Pohjarakennusmenetelmien elinkaarietäisyyteen vaikuttavia tekijöitä                            |    |
| Liite 2 | Esimerkki pohjarakennusmenetelmän valinnasta   |    |
| Liite 3 | Penkereen luokittaminen urakan hankintaa varten odotettavissa olevan painumatasaisuuden mukaan |    |

# 1 Johdanto

## 1.1 Oppaan tarkoitus ja sisältö

Oppaan tarkoitus on esittää pohjarakennusratkaisun valinnassa huomioonotettavat tekijät sekä kuvata elinkaarikustannusten perusteella tapahtuvan valinnan kulku. Julkaisu on tehty tieväylän näkökulmasta, mutta sitä voidaan soveltuvin osin käyttää myös ratarakenteiden ja muiden väylien suunnittelussa.

Oppaassa käsitellään sekä penkereitä että leikkauksia pehmeiköillä.

## 1.2 Opas suunnitteluohjeiden tukena

Käsikirja on laadittu väyläsuunnittelijoille ja sitä voidaan hyödyntää tien pohjarakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa Liikenneviraston ohjeistukseen ja hankekohtaisiin suunnitteluperusteisiin ja tuotevaatimuksiin tukeutuen. Suunnitelmassa julkaisuun voidaan viitata tarvittavilta osilta.

Geotekninen suunnittelu Liikenneviraston hankkeissa perustuu seuraaviin asiakirjoihin ja ohjeisiin:

1. Hankekohtaiset suunnitteluperusteet ja tuotevaatimukset
2. Eurokoodi 7 osat 1 ja 2 sekä osan 1 kansallinen liite (LVM-liite)
3. Eurokoodin soveltamisohjeet NCCI 7 ja NCCI 1 (Liikenneviraston soveltamisohjeet)
4. Tien geotekninen suunnittelu (Liikenneviraston ohjeita 10/2012) ja Sillan geotekninen suunnittelu (Liikenneviraston ohjeita 11/2012)
5. Muut Liikenneviraston ohjeet.

## 1.3 Suunnitteluvaiheet ja oppaan soveltaminen

Oppaassa esitetään ratkaisun valinta, joka periaatteessa voi tapauksesta riippuen painottua eri tavalla eri suunnitteluvaiheissa. Käytännössä suurin paino on tiesuunnitteluvaiheella ja rakennussuunnitteluvaiheella. Esisuunnitteluvaiheita on käsitelty lyhyesti.

Tiesuunnitteluvaiheessa selvitetään:

- tiealueen tarve
- pohjarakennusmenetelmän toteutettavuus
- kustannukset
- toteutettavuus ja kustannukset myös jollekin vaihtoehtoiselle ratkaisulle.

Vaihtoehtoistenkin ratkaisujen toteutettavuuden ja kustannusten selvittäminen ja pohjatutkimusten täydentäminen näitä tavoitteita varten on erityinen painopiste täydennettäessä tiesuunnitelmaa rakennussuunnittelun sisältävän urakan (esim. ST-urakka, elinkaariurakka) hankintaa varten. Urakoitsijan on siihen mennessä tehtyjen tutkimusten perusteella pystyttävä hinnoittelemaan pohjarakennustyöt ja niiden vaih-

toehdot. Sopimusmuodosta riippuen urakan aikana muuttuvien pohjarakennustyön määrien vaikutus urakkasummaan voi vaihdella.

Suosituksiksi on muodostunut, että pohjatutkimukset tehtäisiin tiesuunnitelman täydennysvaiheessa rakennussuunnittelutarkkuudella. Tutkimusten täydentäminen urakkatarjousvaiheessa tilaajajohtoisesti on aikataulullisesti hankalaa ja urakoitsijan tekemä oma-aloitteinen täydentäminen paljastaa aikomuksia muille tarjoajille. Niukoilla tutkimuksilla aloitetun urakan pohjatutkimusten täydentäminen urakan aikana jää käytännössä helposti vähemmäksi kuin olisi optimaalista.

## 2 Pohjarakennusmenetelmän valintatutkimukset

### 2.1 Orientoivat tutkimukset

Ensimmäisten, orientoivien pohjatutkimusten tavoite on selvittää, tarvitaanko pohjanvahvistuksia tai pohjanvahvistusten tarpeellisuuden tarkempaa tarkastelua vai ovatko normaalit penger- ja leikkausrakenteet ilman muuta perustettavissa ilman erikoistoimenpiteitä. Orientoivia tutkimuksia ei yleensä tehdä tasaisesti koko tielinjan pituudella, vaan ne keskitetään oleellisille ongelmakohdille.

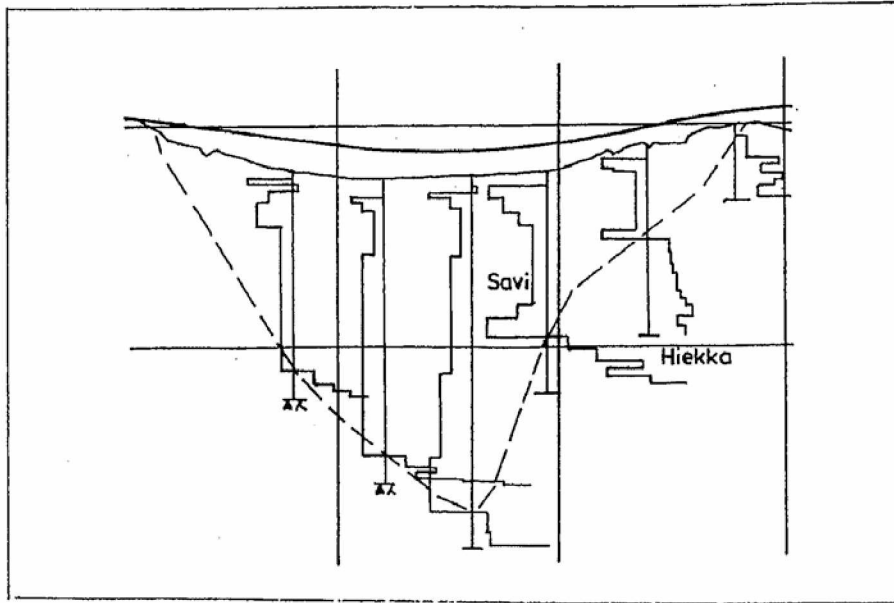
Rakennetussa ympäristössä vanhat pohjatutkimustiedot tekevät usein orientoivat tutkimukset tarpeettomiksi.

### 2.2 Maakerrosrajojen ja maanpinnan muotojen selvittäminen

Selvitettäessä maakerrosrajoja pehmeikköalueella tärkeimmät ja yksinkertaisissa tapauksissa riittävät tiedot ovat:

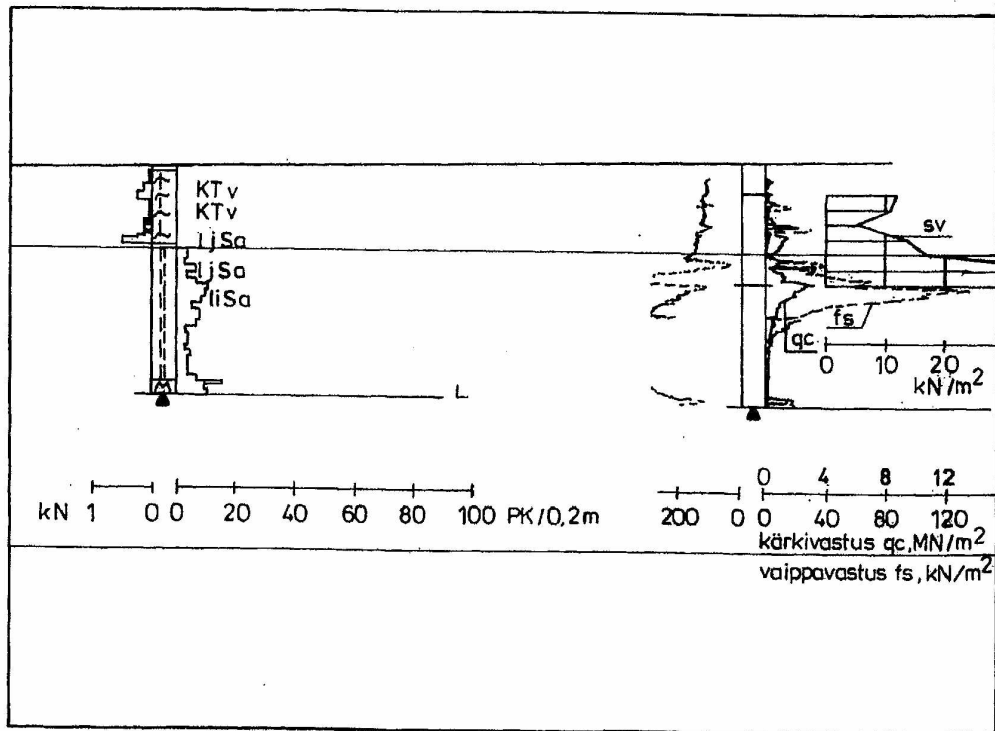
- pehmeiden kerrosten alapinta
- kuivakuorikerroksen paksuus
- esiintyykö pehmeiköllä turvetta tai liejua.

Ennen tutkimusten laajamittaista käynnistämistä on harkittava, käytetäänkö maakerrosrajoja selvittävänä peruskairauksena painokairausta, puristinheijarikairausta vai CPTU-kairausta ja voidaanko geofysikaalisia tutkimuksia hyödyntää. Valintaan vaikuttavia näkökohtia ovat maaperä, todennäköiset pohjanvahvistusratkaisut, käytettävissä oleva kalusto ja tutkimuskustannukset. Mainittujen kolmen menetelmän kustannusten välillä ei ole suuria eroja. CPTU-kairaus soveltuu käytettäväksi silloin, kun etukäteen harvakseltaan tehdyin paino- tai puristinheijarikairauksin on selvitetty, mihin syvyyteen asti maaperä on kivetöntä ja CPTU-kairauksin tutkittavaksi soveltuvaa. Pehmeiden kerrosten paksuuden selvittämisessä sekä muidenkin maakerrosrajojen arvioinnissa painokairaus on perinteisesti yleisin menetelmä ja monissa olosuhteissa se edelleen puoltaa paikkaansa. Painokairaus soveltuu, kun geologiset olosuhteet ja maakerrosrajat ovat selväpiirteiset. Tällaista tapausta esittää kuva 1.



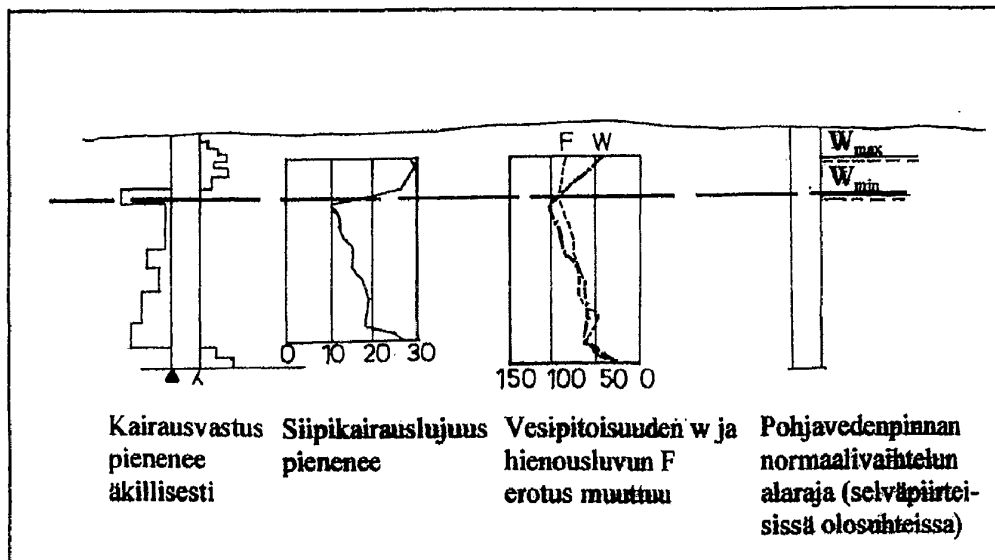
Kuva 1. Painokairauksen käyttö maakerrosrajojen selvittämiseen pehmeiköllä.

Kun maakerrosrajat ovat vaikeammin tulkittavat, painokairausten tueksi tai asemasta tarvitaan muitakin kairauksia. Sitkeillä ja kovilla savilla painokairauksen erottelutarkkuus on huonompi kuin pehmeämmillä savilla ja puristinheijarikairaus on soveltuvampi. Erityisesti pitää varoa antamasta maakerrosrajojen tulkinnassa liian suurta painoa painokairauksen rajakohdille, joilla kairausvastus siirtyy vapaapainuman puolelta kierron puolelle. CPTU-kairaukset soveltuvat erilaisten savi- ja silttikerrosten erottelemiseen ja esimerkiksi sen tulkitsemiseen, johtuuko kairausvastuksen muutos maan lujuuden muutoksesta vai maalajimuutoksesta. Kuvassa 2 on esitetty tapaus, jossa savikerroksen alaosan lujuus näyttää varsin erilaiselta painokairauksen ja CPTU-kairauksen perusteella arvioiden.



Kuva 2 Paino- ja CPTU-kairauksen vertailua sitkeissä savissa.

Kuivakuorikerroksen alarajan tulkinta perustuu kairauksiin ja näytetutkimuksiin. Kuvaan 3 on koottu tavallisimpia tulkintatapoja, jotka eivät yksittäisinä ole täysin luotettavia, mutta samansuuntaisia tuloksia antaessaan kertovat kuivakuoren alarajan sijainnin.



Kuva 3. Kuivakuorikerroksen alarajan tulkinta.

Pehmeikön pintaosissa esiintyvät turve- tai liejukerrokset aiheuttavat huomattavia rajoituksia, lisähankaluuksia tai lisäkustannuksia kysymykseen tuleville pohjanvahvistusmenetelmille. Vaikutus on pienin, kun todennäköisenä pohjanvahvistustapana on massanvaihto kaikkien pehmeiden kerrosten alarajaan ulotettuna, mutta kaikissa muissa ratkaisuisissa suurempi. Eloperäisten kerrosten esiintymisestä saadaan usein aavistus kartta- tai ilmakuvatulkinnan tai maastokäynnillä tehtyjen silmä määräisten havaintojen perusteella. Turve- tai liejukerrostuman alarajan kulkua voidaan tutkia:

- kairauksin (esimerkiksi rajapinta alapuoliseen saveen ei aina tulkittavissa)
- tarvittaessa tiheään sijoitetuilla näytepisteillä
- turvekerrosten osalta maatumalla.

Pehmeän kerrostuman erottelu erilaiisiin savi- ja silttikerroksiin ei yleensä onnistu pelkkien kairausten perusteella, vaan erilaisten kairausten ja näytetutkimusten ja joskus geofysikaalisten tutkimusten antamaa tietoa yhdistellen ja tulkiten. Sivukalteva maasto aiheuttaa pohjatutkimuksille ja geotekniselle suunnittelulle lisävaatimuksia seuraavista syistä:

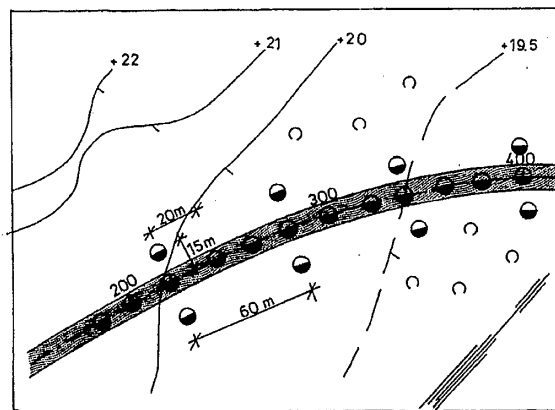
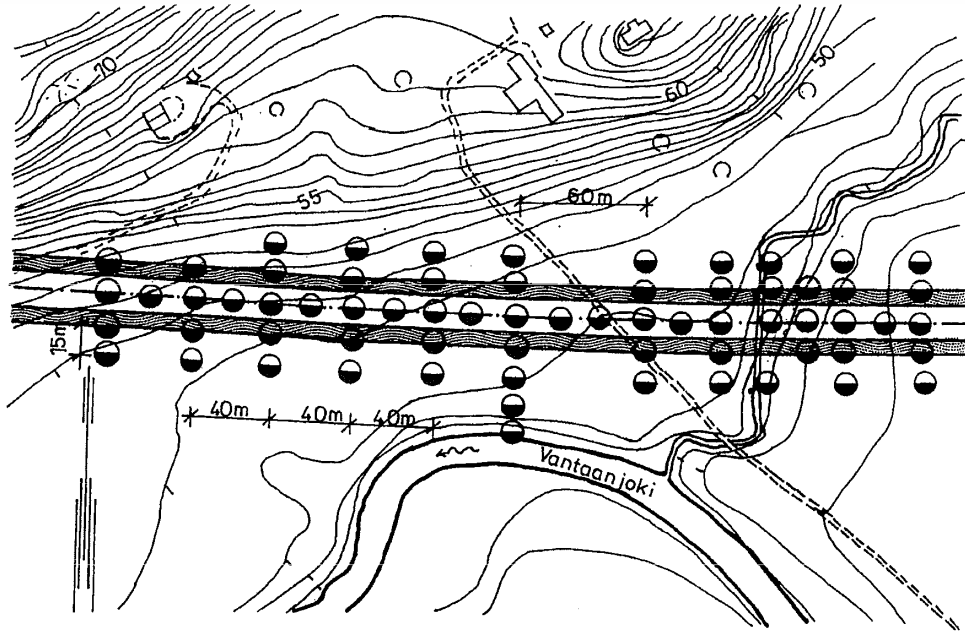
- Maakerrosten paksuus, lujuus ja konsolidaatiotila muuttuu sivukaltevassa maastossa usein jyrkästi ja aiheuttaa tavallista tiheämpää pohjatutkimustarvetta.
- Harjujen lievealueilla tai entisillä rantavyöhykkeillä voi maanpinnassa esiintyä karkearakeisia, usein kivisiä kerroksia, joiden alla on savea tai silttiä.
- Alueellinen vakavuus on tarkasteltava ja se on usein määräävä. Tämä antaa aiheutta tavallista leveämmän alueen tutkimiseen.
- Sivukaltevassa maastossa ei aina riitä vakavuuden tarkasteleminen  $\phi=0$ -menetelmällä, vaan tarvitaan  $c\phi$ -tarkasteluja, jotka edellyttävät lähtötiedoiksi kolmiakselikokeita ja huokosvedenpainneiden selvittämistä.

Alueellisen vakavuuden tarkasteleminen ja joskus myös  $c\phi$ -menetelmän käyttö ovat tarpeen myös silloin, kun sivukaltevuus aiheutuu rakentamistoimenpiteistä, kuten esimerkiksi laskuojien kaivusta taikka olemassa olevien uomien perkaamisesta.

Sivukaltevassa maastossa on tarkistettava, että maanpinnan muodot määritetään riittävän leveältä alueelta. Tällöin on myös kiinnitettävä huomiota siihen, että vesistöjen pohjan muoto tutkitaan riittävän tarkasti.

Yleensä maakerrosrajojen selvittämiseen tähtäävä peruskairausverkosto ohjelmoidaan seuraavankaltaisesti, ks. myös kuva 4:

- Kairaukset sijoitetaan poikkileikkaukseen samalla tiheydellä ja samalle leveydelle kuin lopullisissa pohjatutkimuksissa, mutta poikkileikkauksia tutkitaan pidemmin välimatkoin kuin lopullista tarkkuutta tavoiteltaessa. Poikkileikkausten väliin tehdään keskilinjakairaukset.
- Sivukaltevassa maastossa tutkimuspoikkileikkauksia levennetään tapauskohtaisen tarpeen mukaan.
- Poikkileikkausten suositeltava välimatka on lyhyillä pehmeiköillä 40 m ja pitkillä (yli 300 m pituisilla) pehmeiköillä 40-80 m riippuen pohjasuhteiden vaihtelevuudesta.



Kuva 4. Peruskairausverkoston, esimerkiksi painokairausten, ohjelmointi pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten, a) leveä tie sivukaltevassa maastossa, b) kapea tie tasaisessa maastossa.

Sähkövastusluotauksella voidaan mallintaa savikerrostuman vesipitoisuusvaihteluita, joilla on korrelaatio painumaominaisuuksien kanssa. Saven sähkönjohtavuus riippuu eniten huokosveden määrästä ja sen suolapitoisuudesta, mutta myös sähköä johtavien mineraalien, kuten kiisujen ja grafiitin määrästä. Menetelmää voidaan parhaiten soveltaa ödometrikokeilla kalibroituna jatkuvan painumaprofiilin määrittämiseen.

Gravimetrisessä mittauksessa eli painovoimamittauksessa kallionpinnan syvyyttä tutkitaan kannettavalla mittauslaitteella kallion ja irtomaan tiheyseron perusteella. Mielekäs tarkkuus saavutetaan, kun maakerrokset ovat paksuja ja mahdollisimman homogeenisiä. Menetelmää on joskus käytetty paksujen savikoiden syvyyden tutkimiseen alustavissa suunnitteluvaiheissa.

Kun nykyisen tien viereen rakennetaan uusi tie, esimerkiksi moottoritien toinen ajorata, vanhoista suunnitelmista saatavat nykyisen tien pohjatutkimustiedot voivat huomattavastikin vähentää pohjatutkimustarvetta etenkin painokairausten osalta. Alustavat arviot kysymykseen tulevista pohjanvahvistusratkaisuista otetaan tutki-



musten ohjelmoinnissa huomioon. Muutamia esimerkkejä tällaisista näkökohdista ovat seuraavan kaltaiset:

- Jos vastapenkereitä tai kevennysleikkauksia voidaan tarvita, tämä lisää tutkittavan alueen leveyttä.
- Jos pengerpaalutus vaikuttaa todennäköiseltä perustamistavalta, on tarpeetonta tehdä tiheää painokairausverkostoa, jota lopullista paalupituuden määrittystä varten joudutaan kuitenkin täydentämään heijarikairauksin. Käyttämällä painokairauksen sijasta puristinheijarikairausta saadaan lopullisessa suunnittelussa paremmin hyödynnettäviä tuloksia.
- Tutkimustiheyttä harkittaessa voidaan valita vaihtoehtoisista tiheyksistä parempi, jos tiedetään kysymykseen tulevat pohjanvahvistusvaihtoehdot ja etteivät lisätiedot mene hukkaan minkään vaihtoehdon kohdalla.

## 2.3 Pehmeiden kerrosten lujuustutkimukset

Pehmeiden kerrosten leikkauslujuus määritetään yleensä siipikairauksella. Siipikairaukset ohjelmoidaan:

- joko yhtäaikaisesti paino- tai puristinheijarikairausten kanssa, kun on odotettavissa, että maakerrokset ovat hyvin pehmeitä tai pehmeitä (suljettu leikkauslujuus alle 25 kPa),
- tai em. peruskairausten tekemisen jälkeen varsinkin silloin, kun maakerroksista suurin osa on sitkeitä tai kovia, jolloin siipikairaustarve on vähäisempi, siipikairaaminen vaikeampaa ja vähien siipikairausten oikea sijoittaminen oleellisempää.

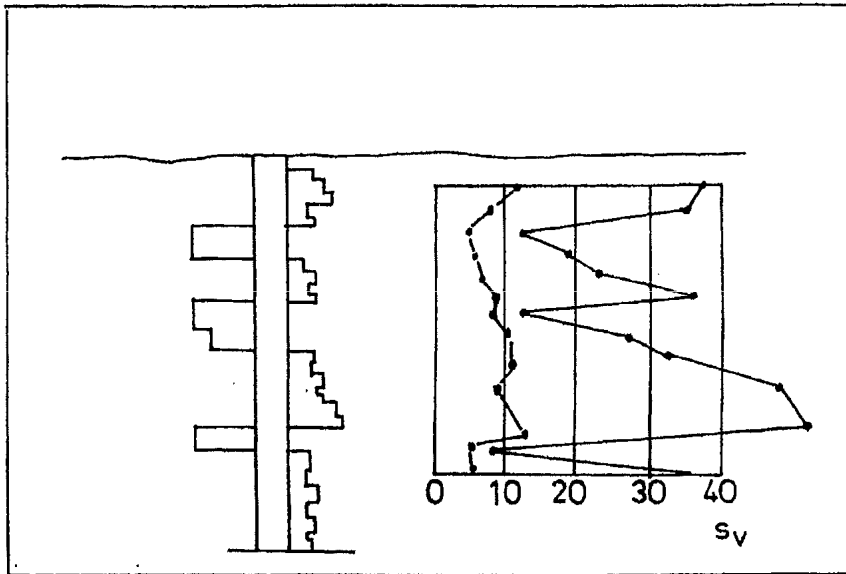
Siipikairausten määräksi pehmeillä ja hyvin pehmeillä savikoilla voidaan suositella:

- 20–30 % paino- tai puristinheijarikairausten määrästä, kun penkereen korkeus on alle 4 m
- 10–20 % paino- tai puristinheijarikairausten määrästä suurilla pengerkorkeuksilla, kun kysymykseen tulevia ratkaisuja ovat lähinnä massanvaihto, pengerpaalutus ja syvästabilointi lujilla pilareilla (leikkauslujuus yli 200 kPa).

Siipikairausten ohjelmointia varten tarvitaan aikaisemmin tehtyjen kairausten suuntaa-antavaa tulkintaa. Tavallisesti painokairauksen siirtyessä 100 kg kairausvastuksesta puolikierrosten puolelle maakerrosten suljettu leikkauslujuus on vähintään 20–30 kPa. Ehdottoman luotettavana tätä arviota ei voida pitää varsinkaan silloin, kun pehmeiden kerrosten päällä on täytemaata tai muuta kovaa maata, joka aiheuttaa tankokitkaa, tai yleensäkin suurilla syvyyksillä. Edellä esitetystä voidaan päätellä, että painokairausten ollessa kierron puolella ei alle 3 m penkereillä ole yleensä laajaa siipikairausten tarvetta vakavuuden selvittämistä varten. Tarkistusluontoisia siipikairauksia kannattaa tällöinkin tehdä.

Kovissa kerroksellisissa silttipitoisissa maissa siipikairaus voi antaa harhaanjohtavan huonoja tuloksia, kun maa häiriintyy siipikairaa maahan upotettaessa, jolloin varsinkin erityisen kovan kerroksen alapuolinen ensimmäinen lukema voi olla todellista pienempi. Esimerkki tällaisesta tapauksesta on esitetty kuvassa 5. Tämän kaltaisissa olosuhteissa kannattaa harkita siipikairausten korvaamista muilla tutkimusmenetelmillä. Myös häiriintymättömien näytteiden ottaminen saattaa kyseisissä olosuhteissa

olla vaikeaa. CPTU-kairalla onnistutaan parhaiten erottelemaan savi- ja silttikerrosten vaihtelut ja saamaan suuntaa-antava käsitys leikkauslujuudesta.



Kuva 5. Siipikairaus kovassa kerroksellisessa silttipitoisessa maassa.

Kun maakerrosten hienousluku on suuri (yli 80 %), eli varsinkin humuspitoisissa kerroksissa, siipikairalla mitattua leikkauslujuutta ei voida sellaisenaan käyttää laskelmissa, vaan sitä on redusoitava. Tätä tarkoitusta varten varmistetaan, että maanäytteistä määritetään hienousluku häiriintyneen näytteen kartiokokeella. Useimmiten painumaominaisuuksien selvittämistä varten tarvitaan joka tapauksessa enemmän näytteitä kuin pelkästään siipikairausten redusointia varten. Siipikairaustulosten redusointimenettely on esitetty julkaisussa Liikenneviraston ohjeita 9/2010 Tiepenkeiden ja leikkausten suunnittelu.

Pehmeiden kerrosten suljettu leikkauslujuus voidaan myös määrittää häiriintymättömille näytteille laboratoriossa tehtävin kartiokokein. Useimmiten kuitenkin siipikairaustulokset ovat luotettavampia, sillä kartiokoe on herkkä seuraaville virheille:

- Saadaan todellista huonompia tuloksia, jos näytettä ei onnistuta saamaan riittävän häiriintymättömänä.
- Saadaan todellista parempia tuloksia, jos näyte pääsee vähänkin kuivumaan.

## 2.4 Painumaominaisuuksien selvittäminen

Pehmeiden maakerrosten painumaominaisuudet määritetään häiriintymättömille näytteille tehtävin ödometrikokein. Silloin, kun maakerrokset voidaan suhteellisen luotettavasti olettaa normaalikonsolidoituneiksi, voidaan ödometrikokeiden antaman tiedon jatkeena käyttää painumien laskemiseen maan vesipitoisuuteen perustuvia likimääräiskaavoja, joiden pehmeikkökohtainen "korjauskerroin" tarkistetaan harvakseltaan tehdyin ödometrikokein. Vesipitoisuus voidaan määrittää maanäytteistä taikka jatkuvana profiilina sähkövastusluotauksella.

Ödometrikokeiden lukumäärää harkittaessa otetaan huomioon mm. seuraavat näkökohdat:

- Kun pengerkorkeus on maapohjan lujuteen nähden niin suuri, että perustamisratkaisuina tulevat kysymykseen vain pengerpaalutus, massanvaihto tai syvästabilointi kovilla pilareilla, ei mitoitukseen tarvita tarkkoja tietoja pohjamaan painumaominaisuuksista. Kuitenkin päätien penkereen vierellä voi olla matalampia penkereitä, joiden perustamisen suunnittelussa painumaominaisuuksien tunteminen on tarpeen.
- Kun harkittavien ratkaisujen joukossa on esimerkiksi pystyjoitus, ylipenger tai pengerkevennys, ödometrikokeiden tarve on erityisen suuri jo vertailua varten tehtävien alustavien mitoitusten lähtötiedoksi.
- On parempi tutkia ödometrikokein muutamia näytepisteitä riittävän kattavasti syvyysuunnassa kuin useampia pisteitä huonommalla syvyysuunnalla kattavuudella.
- Näytteenottoa ohjelmoitaessa ei tarvitse vielä ratkaista ödometrikokeiden määrää, sillä lisäkustannus näytteiden ottamisesta häiriintymättöminä on mitätön verrattuna häiriintyneiden näytteiden ottamiseen.
- Osa ödometrikokeista voi epäonnistua esimerkiksi näytteiden häiriintymisen takia ja tästä syystä kokeiden määrän mitoituksessa on syytä tiettyyn varmuusvaraan.

Ödometrikokeiden tiheydeksi suositellaan 1 piste / 150-200 m, kun selvitetään pystyjoituksen, ylipenkereen tai pengerkevennyksen soveltuvuutta. Syvästabiloinnin mitoitus on painumaparametreille vähemmän herkkä. Maanvaraisratkaisussa ödometrikokeiden antaman tiedon jatkeena voidaan tapauksesta riippuen käyttää myös edellä mainittuja vesipitoisuuteen perustuvia likimääräismenetelmiä.

## 2.5 Pohjatutkimukset nykyisen tien kohdalla

Nykyiset tiet vaikuttavat tutkimusten ohjelmointiin silloin, kun

- nykyisen tien vaurioita korjataan
- nykyistä tietä korotetaan tai levennetään
- nykyisen tien viereen rakennetaan uusi tie
- uusi tie risteää nykyistä tietä.

Nykyisen tien perustamistapa selvitetään aloittaen vanhojen suunnitelmien tarkastelusta. Jos perustamistavasta tai sen tarkemmasta toteutumasta jää epävarmuutta, voidaan joutua tekemään tutkimuksia asian varmistamiseksi. Tavallisimpia tapauksia on massanvaihdon toteutuneen syvyyden tarkistaminen porauksin. Samaan tarkoitukseen on joskus käytetty myös maatutkaa, mutta kokeilut eivät yleensä ole olleet onnistuneita. Massanvaihdon täyttömateriaaliin sekoittuu usein siinä määrin pehmeää pohjamaata, että se vaikeuttaa rajakerrosten tulkintaa maatutkalla.

Jos nykyinen tie on rakennettu maanvaraisena tai mahdollisesti kevennystä käyttäen, on painumaominaisuuksien selvittämiseen käytettävissä itse asiassa täysimittakaavainen painumakoe. Tällöin

- aloitetaan järjestelmällinen painumaseuranta suunnitteluajaksi ja suunnittelu- vaiheiden välillä jatkettavaksi
- selvitetään toteutuneet lisäpäälystykset aloittaen kunnossapitäjien haastattelumisesta ja merkittävien lisäpäälystysten tapauksessa tarkemmin tutkimuksiin
- selvitetään tien aikaisemmin tapahtunut painuma (= tien alkuperäinen korkeus – tien nykyinen korkeus + toteutuneet lisäpäälystykset)
- viitteellisiä tietoja painuman ajallisesta kehityksestä aloittaen em. haastatteluista
- toteutuneet kuormitukset, lähinnä päälysrakenteen tai penkereen ja pohjamaan rajapinta sekä mahdollisten kevennysten toteutuma.

Edellä mainituissa päälystekerroksen paksuuden, rakennekerrosten ja penkereen paksuuden ja kevennyspaksuuden tutkimuksissa maatulka on osoittautunut erittäin käyttökelpoiseksi, nopeaksi ja kustannuksiltaan edulliseksi menetelmäksi.

Nykyisen tien rakennekerrokset ja pengertäyte voivat aiheuttaa hankaluuksia tai lisäkustannuksia pengerraalutuksessa, pystyjoituksessa tai erityisesti syvästabiloinnissa. Hankaluus on sitä suurempi, mitä kivisempää ja lohkarisempää materiaalia täyttö on ja mitä syvemmälle se ulottuu. Täytteen laadun selvittäminen kannattaa aloittaa vanhojen suunnitelmien tarkastelusta ja rakentajien haastattelusta. Jos muihin tarkoituksiin käytetään maatulkaa, voidaan sillä yrittää saada selville myös täytteen lohkaraisuutta, mutta suurta tarkkuutta ei ole odotettavissa esimerkiksi saveen sekoittuneen täytön tutkimisessa. Koekuoppatutkimus voi olla usein välttämätön.

Erytyisesti silloin, kun nykyistä tietä korjataan, korotetaan, levennetään tai ylitetään ja perustamistapa on joko nykyisellä tai uudella tiellä maanvarainen tai kevennys, on tutkimuksissa kiinnitettävä huomiota nykyisen tien alla tapahtuneeseen pohjamaan lujuus- ja painumaominaisuuksien muutokseen. Tätä varten:

- tehdään siipikairauksia sekä penkereen alta että luonnontilaisesta maasta
- tehdään odometrikokeita penkereen alta sekä tarvittaessa myös luonnontilaisesta maasta
- selvitetään mahdollisesti tapahtunut pohjavedenpinnan muutos.

Nykyisen tien suunnitelmasta saadaan pohjatutkimustietoja, joista hyödynnettäviä ovat ainakin pehmeiden kerrosten paksuutta koskevat sekä näytetiedot. Vanhojen siipikairausten luotettavuuden arvioinnissa pitää ottaa huomioon, että ennen 1970-luvun puoliväliä siipikairaukset useimmiten tehtiin momenttiavainta käyttäen, mikä antaa todellista lujempia tuloksia. Nykyisilläkin siipikairoilla on havaittu tulosten vaihtelevuutta ja aiheeseen liittyvä tutkimus on meneillään.

Nykyisen tien kohdalla tehtävät tutkimukset vaativat alkureiän tekemisen penkereeseen porakoneella. Samalla dokumentoidaan päälystepaksuus, pengertäytteen laatu ja pengertäytteen alapinta. Jo tutkimusten ohjelmointivaiheessa selvitetään, pitääkö tutkimuksia tehdä myös mahdollista kiertotietä varten.

Nykyisen tien pohjanvahvistusten ulottuvuus tien leveyssuunnassa määritetään alustavasti vanhojen suunnitelmien perusteella. Maastossa tehtävät tarkistukset esim. koekuoppia käyttäen ajoitetaan niin, että ratkaisun toteutettavuutta varmistavat tutkimukset tehdään tiesuunnitelmavaiheessa. Rakennussuunnitteluvaiheeseen voidaan jättää pienempiä varmistuksia (vaikkapa paalulaattarakenteen leveys, kun käytössä on jokseenkin luotettavat vanhat suunnitelmat).

## 2.6 Ympäristöön kohdistuvat tutkimukset

Pohjanvahvistusmenetelmän valintaan tähtäävien tutkimusten ohjelmoinnissa otetaan mahdollisten ympäristövaikutusten selvittäminen huomioon:

- ulottamalla tutkimuspoikkileikkaukset lähettyvillä oleviin rakennuksiin tai rakenteisiin asti, kun on pelättävissä esimerkiksi työnaikaisten kaivutilanteiden aiheuttamia vakavuusongelmia, pohjaantäytössä pehmeiden massojen sivusiirtymiä (jopa useiden kymmenien metrien etäisyydellä) tai paalutuksesta aiheutuvaa tärinää, sivusiirtymää, painumaa tai huokosvedenpaineen nousua (harvoin yli 20–40 m etäisyydellä)
- sijoittamalla pohjavesiputkia ja näytepisteitä myös tiealueen ulkopuolella olevien mahdollisessa vaaravyöhykkeessä olevien rakennusten tai rakenteiden viereen, kun on odotettavissa pohjaveden alenemista, joka voi karkeiden maakerrosten välityksellä ulottua satojenkin metrien etäisyydelle
- tutkimalla arkistoselvityksenä ja vähintään silmämääräisenä tarkasteluna rakennusten ja muiden rakenteiden tyyppi, kunto, perustamistapa ja -taso
- selvittämällä pohjavesisuojausten tarve pohjavesialueilla
- selvittämällä paineellisen pohjaveden mahdollinen esiintyminen
- selvittämällä luonnonsuojelullisista näkökohdista pohjanvahvistusmenetelmille mahdollisesti aiheutuvat rajoitukset.

## 3 Pohjanvahvistus- ja perustamistapamenetelmät

### 3.1 Penkereiden perustamistavat

#### 3.1.1 Perustamistavan valinnan tavoitteet

Tiepenkereen perustamistavan valinnassa perusvaatimukset ovat:

- riittävä varmuus tiepenkereen sortumaa ja heikosta vakavuudesta aiheutuvia siirtymiä vastaan
- painumien pysyminen hyväksyttävissä rajoissa
- yhteensopivuus muiden rakenteiden, esim. siltojen kanssa.

Varmuusvaatimukset on esitetty Eurokoodi 7:ssä, sen kansallisessa liitteessä (LVM-liitteessä) ja soveltamisohjeessa NCCI 7. Sallitut painumat on esitetty joko hankekohdaisissa tuotevaatimuksissa tai Liikenneviraston ohjeessa 10/2012 Tien geotekninen suunnittelu.

#### 3.1.2 Maanvarainen pengeri, vastapenger, esikuormitus

Vakavuus- ja painumakriteerien salliessa tiepenger voidaan perustaa maanvaraisena ilman erikoistoimenpiteitä.

Vastapenger (ks. kuva 1) parantaa penkereen vakavuutta toimimalla vastapainona ja se mitoitetaan vakavuuden perusteella. Menetelmä soveltuu silloin, kun vakavuus on muutenkin melko lähellä riittävää (kokonaisvarmuusluvun suuntaa-antava arvo savi-pehmeiköillä vähintään 1,2). Maaston sivukaltevuus heikentää vastapengerin tehokkuutta.

Painumiin vastapengerin vaikutus on yleensä hyvin pieni. Syvillä pehmeiköillä vastapengerin kuormittava vaikutus ulottuu varsinaisen penkereen alle ja jonkin verran kasvattaa konsolidaatiopainumaa, mikä saattaa joskus olla edullista tien poikkikaltevuuksien säilyttämisen kannalta. Toisaalta vastapengerillä voidaan vakavuutta usein parantaa minimivaatimusta enemmän ja tällöin voidaan pienet plastiset muodonmuutokset kokonaankin estää.

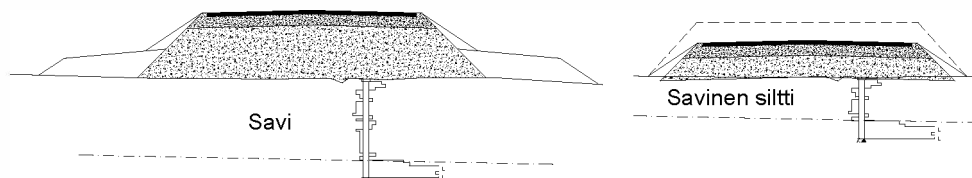
Vastapenger on rakennuskustannuksiltaan huokea menetelmä ja useimmiten suoranaista säästöä siihen nähden, että vastapengeriin käytettävät massat jouduttaisiin kuljettamaan läjitysalueelle. Useimmiten huonolaatuisetkin massat kelpaavat vastapengeriin. Vastapengerin käyttöä käytettäessä vakavuutta kannattaa useimmiten parantaa minimivaatimuksia enemmän.

Vastapengerin käyttöä rajoittaa usein tilantarve. Vastapengerin tarve ja käyttömahdollisuudet on teialueen hankintaa varten pystyttävä määrittämään tiesuunnitelmapaiheessa.

Jos vastapenkereen odotetaan painuvan huomattavasti, esimerkiksi turvepehmeiköillä, painuma voi vaikuttaa pääpenkereen vakavuuteen. Joissain erikoistapauksissa on päädytty osittaiseen massanvaihtoon vastapenkereen alla painumien rajoittamiseksi ja vastapenkereen painon lisäämiseksi.

Esikuormituksella voidaan pienentää käyttövaiheen aikaisia painumia. Esikuormituksen käyttäminen edellyttää, että penkereen vakavuus on riittävä. Erilaisia esikuormitusratkaisuja ovat:

- penkereen rakentaminen lopulliseen korkeuteensa hyvissä ajoin ennen tien ottamista liikenteelle.
- penkereen korottaminen em. tasoon vaiheittain vakavuuden pitämiseksi riittävässä (vain silttipehmeiköillä).
- penkereen kuormittaminen lopullista pengerkorkeutta suuremmalla kuormalla ennen tien ottamista liikenteelle (ylipenkereen käyttö, ks. kuva 6).



Kuva 6. Vasta- ja ylipenger

### Varmistettavat asiat

Perustettaessa penger maanvaraisena, mahdollisesti vastapenkereitä ja/tai esikuormitusta käyttäen, on varmistettava:

- Maakerrokset ja niiden lujuusominaisuudet erityisesti vakavuuden kannalta kriittisimmillä kohdilla ja varmuustasosta riippuen laajemmaltikin.
- Erityisesti vastapenkereitä käytettäessä maakerrokset ja niiden lujuusominaisuudet riittävän leveällä alueella.
- Maakerrosten painumaominaisuudet, yleensä ödometrikokein, jotta odotettavissa olevien painumien suuruus ja nopeus voidaan laskea. Erityistä huomiota kiinnitetään painumaominaisuuksien vaihteluun.
- Esikuormitusta käytettäessä kiinnitetään erityistä huomiota painumanopeuden selvittämiseen, jotta esikuormituksen tehokkuus voidaan arvioida. Varsinkin ylipengertä käytettäessä tarvitaan tarkat lujuustiedot, jotta ylipenger voidaan mitoittaa optimaalisesti.

### Pohjatutkimussuosituksen tiesuunnitelman laatimista varten

Pohjarakennusmenetelmän valintaa varten tehtyjä pohjatutkimuksia täydennetään tarvittaessa niin, että voidaan olla varmoja tiealueen tarpeesta ja maanvaraisen perustamisen onnistumisesta vakavuuden, painumien ja muihin tiehen liittyvien rakenteiden (kuivatus, putkijohdot, reunakivet, melusteet jne.) kannalta.

### Ratkaisun riskit

Penkereen vakavuus voi jäädä tavoiteltua heikommaksi, jos maaston sivukaltevuuden vaikutus aliarvioidaan, taikka lujuudeltaan heikko maakerros jää pohjatutkimuksissa löytymättä.

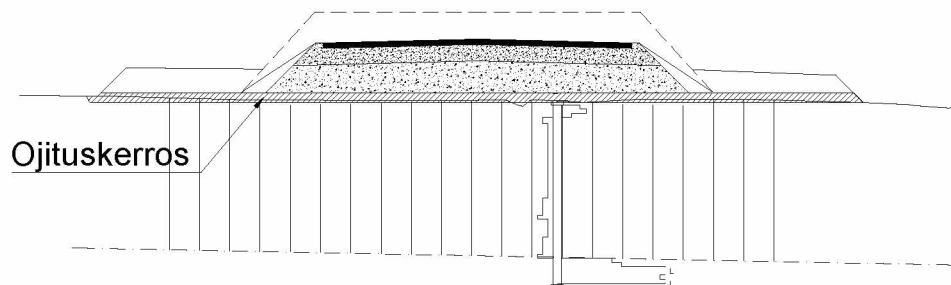
Painumat saattavat muodostua odotettua epätasaisemmiksi. Oikein tehdyn painumalaskelman tarkkuudeksi voidaan arvioida  $\pm 30$  %. Tämä ei yleensä aiheuta ongelmia tasalaatuisina jatkuvissa pohjasuhteissa. Sen sijaan pohjasuhteiden muutoskohdissa tien kaltevuudenmuutokset voivat tulla tavoiteltua suuremmiksi muun muassa sen takia, että kahden pohjatutkimuspisteen välinen painumaero ei yleensä jakaudu tasan pisteiden välimatkalle vaan pohjasuhteiden muutos voi tapahtua oletettua jyrkemmin kyseisellä välillä.

Esikuormituksen pienentävä vaikutus käytönaikaisiin painumiin voi jäädä odotettua pienemmäksi painumanopeuslaskelmien epätarkkuuden taikka odotettua paksumpien savikerrosten takia.

#### 3.1.3 Pystyjoitus

Pystyjoituksessa (ks. kuva 7) savikerrosten painumaa nopeutetaan 1–3 vuodessa tapahtuvaksi käyttäen nauhamaisia ojia, joiden avulla maahuokosista pusertuva vesi johdetaan maan pinnalle ja edelleen vettäjohtavan ojituserroksen kautta avo-oihin. Tavallisesti pystyjoituksen yhteydessä tarvitaan painumien nopeuttamiseksi rakennusaikaisena esikuormituksenä ylipenger ja riittävän vakavuuden varmistamiseksi vastapenkereet. Ylipenkereen asemasta on kokeiltu vakuumikonsolidaatiota, jossa esikuormitus aikaansaadaan alipaineella ilman vakavuuden huononemista. Vakuumikonsolidaatio ei ole kuitenkaan osoittautunut normaalitapauksissa taloudellisesti kilpailukykyiseksi ratkaisuksi.

Pystyjoitus soveltuu käytettäväksi jokseenkin normaalikonsolidoituneilla savikoilla. Humuspitoisissa savissa voi esiintyä merkittävää sekundääripainumaa, johon pystyjoituksella ei voida vaikuttaa. Pystyjoitus on yleensä kustannuksiltaan edullinen pohjanvahvistusmenetelmä, jos rakentamisaikaa on riittävästi käytettävissä ja vakavuus saadaan riittäväksi.



Kuva 7. Pystyjoitus



### Varmistettavat asiat

Pystyjoituksen suunnittelua varten on selvitettävä:

- Penkereen vakavuus ja mahdolliset plastiset muodonmuutokset, myös ylipenkereen sekä mahdollisten vastapenkereiden käyttö huomioon ottaen.
- Eri maakerrosten painumaominaisuudet. Erityisen tärkeitä mitoituksen kannalta ovat konsolidaatiojännitys  $\sigma_c$  ja vaakasuuntainen konsolidaatiokerroin  $c_H$  sekä sekundäärisen konsolidaation tarkistaminen ainakin sillä tarkkuudella, onko se otettava huomioon.
- Rakentamisajan riittävyys ja vastapenkereiden käyttömahdollisuus.

### Pohjatutkimussuosituksien tiesuunnitelman laatimista varten

Pohjarakennusmenetelmän valintaa varten tehtyjä tutkimuksia täydennetään tarvittavassa määrin mm. ödometrikokeiden ja siipikairausten osalta. Erityisen tärkeää on varmistua vastapenkereiden tilantarpeesta sekä ylipenkereen käyttömahdollisuuksista.

Koska pystyjoitus vaatii enemmän rakentamisaikaa kuin useimmat muut pohjarakennusmenetelmät, tämä lisää vaihtoehtoihin ratkaisuihin varautumisen tärkeyttä.

### Ratkaisun riskit

Koska pystyjoituksen periaatteena on painumien nopeuttaminen, kaikki käyttövaiheen aikaiset painumat ovat erityisen haitallisia ja vaikeasti korjattavia, koska ne tapahtuvat nopeutuneina. Suunnittelun aikaisiin painumalaskelmiin taikka rakennusaikaisista painumahavainnoista tehtäviin johtopäätöksiin voi tulla liikaa optimistisuutta mm. seuraavista syistä:

- Pohjaveden mahdollista myöhempää alenemistä ei oteta huomioon tai se aliarvioidaan.
- Pohjavesi on esikuormitusvaiheen aikana tavallista korkeammalla, mikä kumoo osan ylipenkereen vaikutuksesta.
- Kaikki esikuormitusvaiheen aikana tapahtuva painuma tulkitaan konsolidaatiopainumaksi, vaikka osa siitä onkin sekundääripainumaa taikka plastista muodonmuutosta. Em. painumalajit ovat oikeaan kohteeseen ja oikein suunnitellun pystyjoituksen yhteydessä lähes merkityksettömän pieniä.
- Painumaa ja konsolidoitumista tarkastellaan esikuormitusaikana yhtenä kokonaisuutena, mutta eri maakerrosten painumanopeus onkin vaihteleva.

Oleellinen asia pystyjoituksen onnistumisen kannalta on painuma-ajan riittävyys. Liian kireän aikataulun mukaisesti kuormitettujen pystyjoitusten epäonnistumisista on runsaasti kokemuksia.

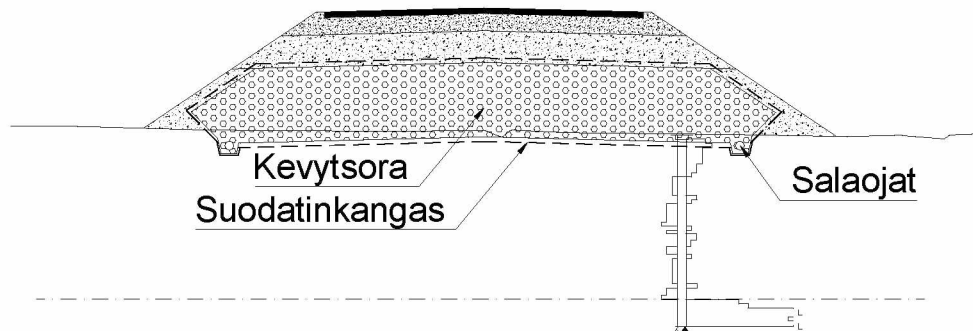
Esikuormitukselle suunnitellaan riittävän väljä aikataulu mm. työnaikaisten yllättävien viivästysten varalta. Esikuormitusta ei myöskään lopeteta heti, kun se näyttäisi laskennallisesti olevan mahdollista. On tapahtunut, ettei painuma ole pysähtynyt ylipenkereen poiston ja/tai pengerkevennyksen tekemisen jälkeen, kuten sen on laskettu pysähtyvän. Tästä syystä pystyjoituksen ja painumattomien perustamistapojen (päälaattarakenne, syvästabilointi tai massanvaihto) väliset siirtymärakenteet ovat

usein epäonnistuneet, vaikka laskelmat on tehty luotettavasti ja yleisesti hyväksytyjä menetelmiä käyttäen.

### 3.1.4 Pengerkevennys

Käyttämällä tavallista kevyempiä pengermateriaaleja penkereen paino saadaan pienemmään, mikä parantaa penkereen vakavuutta ja pienentää painumia, ks. kuva 8. Tapauskohtaisesti vaihtelee varsin paljon, onko mitoituksessa määräävämpi kriteeri vakavuus vai painumat. Varsin tavallisia esimerkkitaupauksia ovat seuraavat:

- Kevennys mitoitetaan vakavuuden perusteella ja kyseisellä kevennysmäärällä tapahtuvat painumat voidaan sallia.
- Painumakriteerien perusteella suunnitellaan suurempi kevennys kuin vakavuus vaatisi.
- Nykyisin useimmiten esiintyvä tapaus on, että pengertä kevennetään niin paljon, että painuma pyritään estämään kokonaan.
- Kevennys yhdistetään esikuormitukseen ja kevennyksen mitoitus voidaan varmentaa esikuormitusvaiheen tarkkailumittausten perusteella. Tämä on yleensä mahdollista vain silttipehmeiköillä, joilla painumat ja maapohjan lujittuminen riittävän suureksi osaksi tapahtuvat rakennusaikana.



Kuva 8. Pengerkevennys

Pengerkevennys sopii monien muiden ratkaisujen kanssa yhdistettäväksi, se sopii muodoltaan helposti säädeltävänä esimerkiksi moniin siirtymärakenteisiin ja kevennyksen rakentaminen on nopeaa.

Tavallisin kevyt pengermateriaali on perinteisesti ollut kevytsora, mutta vaahtolasimurske on aivan viime vuosina huomattavasti yleistynyt. Vaahtolasimurskeen mitoitusominaisuudet (keveys, lämmöneristävyys, kantavuus, nostekäyttäytyminen) ovat varsin samankaltaiset kuin kevytsoran, mutta vaahtolasimurskeen kitkakulma on suurempi, mistä saadaan työtekniisiä etuja. Suurimpaan kevennysvaikutukseen päästään yleensä EPS-kevennyksellä. Muista materiaaleista yleisimpiä on rengasrouhe, joka materiaaliominaisuuksiensa takia soveltuu esimerkiksi nosteelle alttiisiin kohteisiin. Sementillä tai bitumilla stabiloimalla kevytsoran kantavuutta voidaan lisätä huomattavasti, mutta kyseinen ratkaisu on pysynyt erikoistapausluontoisena.

Erlaisilla kevyillä pengermateriaaleilla on hyvinkin toisistaan poikkeavat ominaisuudet päällysrakenteen mitoituksen kannalta ja päällysrakennerratkaisun määrittäminen riittävällä tarkkuudella on välttämätöntä kevennysratkaisujen kustannustarkasteluja varten. Riittävän varmuuden saaminen tienpinnan tavanomaisesta poikkeavaa liuk-

kautta vastaan rajoittaa usein parhaan mahdollisen hyödyn saamista kevenne-  
materiaaleista, joiden kantavuus on erityisen hyvä.

Kevennetyn penkereen suunnittelussa on tarkistettava myös nostesortuman vaara.

Kevennysrakenteet suunnitellaan noudattaen Liikenneviraston ohjetta 5/2011 Keven-  
nysrakenteiden suunnittelu.

### **Varmistettavat asiat**

Pengerkevennystä varten tehtävien pohjatutkimusten ohjelmointi riippuu tapaus-  
kohtaisesti mitoituskriteereistä ja erilaisten kriteerien (vakavuus, painumat, joskus  
noste) määräävyys on selvitettävä etukäteen.

Penkereen vakavuuden selvittämistä varten maapohjan lujuus tutkitaan yleensä siipi-  
kairauksin. Niiden määrä riippuu siitä, kuinka määräävä kriteeri vakavuus on.

Kevennystä varten tarvittavan kaivannon vakavuuden tarkistaminen voi antaa aihetta  
siipikairausten lisäämiseen.

Maapohjan painumaominaisuudet, erityisesti konsolidaatiotila, tutkitaan ödometri-  
kokein.

Pohjavedenpinta on selvitettävä maapohjan kuormitustilanteen määrittämistä varten.  
Mitoituksessa huomioonotettava pohjavedenaleneminen on erittäin tärkeä selvittää.  
Pohjavedenpinta ja penkereeseen rajoittuvien vesistöjen vedenpinta vaihteluineen on  
riittävällä tarkkuudella tunnettava myös nostemitoitusta varten.

### **Pohjatutkimussuositukset tiesuunnitelman laatimista varten**

Pohjarakennusmenetelmän valintaa varten tehtyjä tutkimuksia täydennetään tarvitta-  
vassa määrin lähinnä ödometrikokeiden osalta sekä myös siipikairausten osalta, jos  
vakavuus on merkittävä mitoituskriteeri.

### **Ratkaisun riskit**

Pengerkevennyksessä suurin epäonnistumisen riski on silloin, kun pyritään painumat-  
tomaan rakenteeseen, mutta tässä ei onnistuta. Melko pienikin painuma on haitalli-  
nen kevennetyn penkereen rajautuessa painumattomaan rakenteeseen. Tällaisen rat-  
kaisun epäonnistumiseen voi syynä useimmiten olla:

- pohjaveden alenemisen aliarviointi
- maapohjan konsolidaatiotilan väärinarviointi, jos esimerkiksi oletetaan nykyisen  
penkereen painumien jo tapahtuneen, mutta ne ovatkin vielä käynnissä
- mitoitusvirheet esimerkiksi, jos jännityksenjakautumaa ei ole huolellisesti tarkas-  
teltu ottaen huomioon kevennyksen vaihteleva paksuus tien pituussuunnassa.

Muita syitä voivat olla:

- virheet toteutuksessa (erityisesti keventeen mittojen jääminen vajaiksi)
- keventeen vettyminen ja muuttuminen painavammaksi puutteellisesti kuivatettu-  
na.

Käytettäessä esikuormituksen ja pengerkevennyksen yhdistelmää sekä esikuormituksen aikaisia tarkkailumittauksia kevennyksen mitoitus voidaan tarkistaa optimaalisesti todellisen tarpeen mukaiseksi. Tämä on mahdollista yleensä vain siltti-pehmeiköillä.

Kevennettyjen penkereiden painumien korjaaminen savipehmeiköillä on hankalaa eikä painumattomaan ratkaisuun yleensä päästä ilman syvästabilointia tai paalulaattarakennetta.

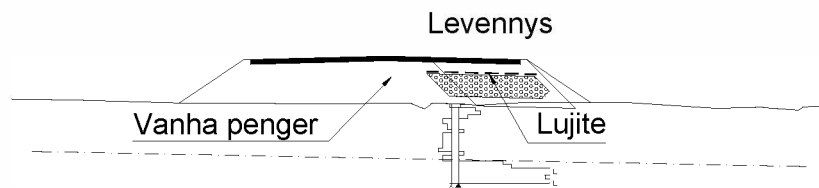
Erlaisia vaihtoehtoja kevennetyn penkereen jälkipainumien korjaamiseksi ovat:

- kevennyksen kasvattaminen syvemmälle kaivaen
- kevennysmateriaalin vaihtaminen vielä kevyempään
- päällysrakenteen ohentaminen erikoisratkaisuin, mikä puolestaan saattaa aiheuttaa liukkausriskiä
- syvästabilointi tai paalulaattarakenne.

### 3.1.5 Lujitteet ja telat

Lujiteverkoilla (teräs- tai muoviverkoilla), teräs-poimulevyillä, puuteloilla taikka myös lujitekankailla voidaan parantaa penkereen vakavuutta ja riittävän järeillä lujitteilla hieman tasoittaa painumia. Menetelmä soveltuu käytettäväksi, kun vakavuus on muutenkin lähellä riittävää ja painumia voidaan sallia. Lujitteet soveltuvat käytettäväksi myös:

- pengerkevennyksen yhteydessä penkereen reunaosan vakavuuden parantamiseen, ks. kuva 9
- paaluhatturakenteissa estämään pengertäytteen valumista hattujen väleihin ja parantamaan hattujen pysymistä vaakasuorassa
- lisävarmistuksena siirtymärakenteissa
- tukimuurimaisissa rakenteissa.



Kuva 9. Lujite pengerkevennyksen yhteydessä.

Lujitteita on kokeiltu myös syvästabiloinnin ja paaluhatturakenteiden yhteydessä tehostamaan kuormien siirtymistä pilareille taikka paaluille, kun pilaritiheys tai paaluhattujen peittävyys on tavanomaista pienempi.

Syvästabiloinnin yhteydessä käytettävän lujitemateriaalin tulee olla emäksisiä pilareita kestävä.

Lujitteiden suunnittelua ja mitoitusta on tarkemmin käsitelty julkaisussa Geolujitetut maarakenteet, Liikenneviraston oppaita 2/2012.

### Varmistettavat asiat

Penkereen vakavuus ja painumat on selvitettävä samoin kuin maanvaraista pengertä varten.

Lujiterakenteen toiminnalle on välttämätöntä, että lujitteeseen mobilisoituu alkujännitys, mikä edellyttää jonkin suuruista muodonmuutosta. Riittävän jäykästä lujitteesta on hyötyä pienehköilläkin muodonmuutoksilla. Täysin painumattomassa ja siirtymättömässä rakenteessa lujite ei toimi. Kuitenkin esimerkiksi siirtymärakenteissa voi kahden rakenteen rajakohdassa käytettävä lujite olla hyödyllinen vastustamaan painumaeron syntymistä, vaikka painumaero ei laskennallisesti olisikaan odotettavissa.

Harkittaessa teräslujitteiden korroosion taikka muiden materiaalien vanhenemisen huomioonottamista mitoituksessa on syytä ottaa huomioon lujitteen tarpeellisuuden väheneminen maapohjan konsolidoituessa.

### Ratkaisun riskit

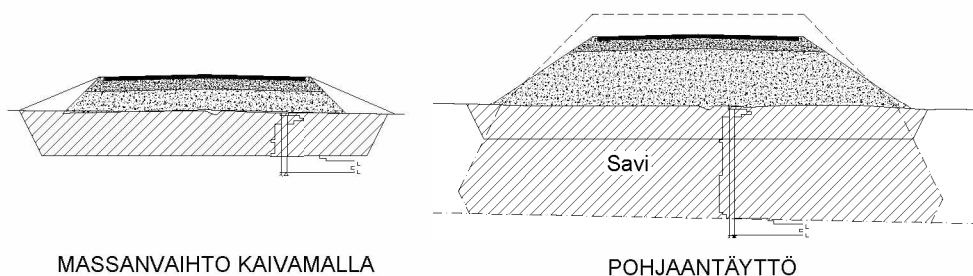
Lujiteratkaisuihin ei yleensä liity suuria riskejä. Lujite ei toimi, jos se ei ole riittävän jäykkä, jotta siihen mobilisoituisi jännitystä pienillä muodonmuutoksilla.

#### 3.1.6 Massanvaihto

Massanvaihdossa kaivamalla (ks. kuva 10) pehmeät maakerrokset kaivetaan pois kovaan pohjaan tai määräsyvyyteen saakka ja korvataan karkearakeisemmilla täyttömassoilla. Menetelmän käyttöä rajoittavat lähinnä kaivannon vakavuuteen liittyvät tekijät ja kaivumassojen käsittelyn ympäristöhaitat erityisesti taajama-alueilla.

Massanvaihdossa pengertämällä eli pohjaantäytössä (ks. kuva 10) pehmeikön syvyys on niin suuri, ettei massanvaihto kaivamalla onnistu. Korkeana päätypengerryksenä etenevä täyttö syrjäyttää ja puristaa pehmeät maakerrokset penkereen sivuille ja eteen. Pohjamaata kaivetaan sekä ennen pengerrystä että yleensä myös pengerryksen aikana. Toteutettujen pohjaantäyttöjen syvyydet ovat yleensä olleet 4–13 m, syvin tiettävästi 18 m. Jotta syrjäyttäminen onnistuisi, kokonaisvakavuuden täytön etenemän suuntaan tulee olla riittävästi alle 1. Pehmeiden massojen syrjäytymisestä aiheutuvat ympäristövaikutukset voivat rajoittaa menetelmän käyttöä.

Massanvaihto suunnitellaan noudattaen Liikenneviraston ohjetta 11/2011 Massanvaihdon suunnittelu.



Kuva 10. Massanvaihto

## Varmistettavat asiat

Massanvaihdossa kaivamalla on varmistettava:

- Massanvaihtosyvyyden riittävällä tarkkuudella.
- Kaivantoluiskien työnaikainen vakavuus varsinkin silloin, kun luiskan sortuminen tai liikkuminen voi aiheuttaa vahinkoa muille rakenteille taikka kaivusvyvyys on poikkeuksellisen suuri. Kaivantoluiskien hetkellinen heikko vakavuus kuuluu menetelmän luonteeseen ja on muissa tapauksissa usein hyväksyttävää.
- Massojen läjitettävyyden ja läjitysalueiden pohjasuhteet.
- Erikoistapauksissa massanvaihtokaivannon vaikutus pohjavedenpintaan tai pohjaveden laatuun taikka paineellisen pohjaveden vaikutus.

Massanvaihtosyvyyden tutkimustarkkuuteen liittyy seuraavia näkökohtia:

- Tärkeintä on varmistaa, ettei pehmeiden kerrosten paksuus jossain ole niin suuri, ettei massanvaihto kaivamalla onnistu.
- Jos kaivantoluiskan lähettyvillä on varottavia rakenteita, massanvaihtosyvyyden on määritettävä tavallista tarkemmin, koska se vaikuttaa ratkaisevasti työnaikaiseen vakavuuteen.
- Massanvaihdon alle jätettävästä maakerroksesta on oltava näytetietoja, jotta tunnetaan maalajit ja niiden häiriintymisherkkyys ja kuinka hyvin suunniteltu massanvaihtoraja on kaivutöiden aikana tunnistettavissa. Pohjatutkimuksia voidaan siis tarvita myös tarpeettoman ylikavun (esimerkiksi ”saven alarajaa” ei tunnista oikein) välttämiseen.

Pohjaantäyttöä varten pitää pohjatutkimuksissa edellä esitettyjen asioiden lisäksi kiinnittää erityistä huomiota seuraaviin seikkoihin:

- Maapohjan lujuusominaisuudet: luonnontilainen lujuus, häiriintymisherkkyys ja häiriintynyt lujuus, lujuudenpalautusominaisuudet häiriintymisen jälkeen, työtä hankaloittavat lujat välikerrokset.
- Pehmeiden massojen sivusiirtymien ympäristövaikutukset.
- Pohjaveden asema.

## Pohjatutkimussuositukset tiesuunnitelman laatimista varten

Pohjarakennusmenetelmän valintaa varten tehtyjä tutkimuksia täydennetään tarvittavassa määrin niin, että kaivamalla tehtävän massanvaihdon toteutettavuudesta ja kustannuksista voidaan varmistua. Siis varmistetaan, että kaivusvyvyys pysyy niissä rajoissa, että täydellinen poiskaivu onnistuu, ja varmistetaan, tuleeko toteutukseen lisäkustannuksia (esim. tuentakustannuksia) lähistön varottavista rakenteista. Pohjaantäytössä on vastaavasti varmistettava, ettei pohjamaan lujuus ole liian suuri ja etteivät massojen sivusiirtymät vaurioita ympäristön rakenteita.

## Ratkaisun riskit

Massanvaihdot kaivamalla ovat yleensä onnistuneet. Massanvaihtosyvyyden kasvaessa kasvaa riski, että poiskaivu ja täytön tiivistäminen ei täysin onnistu ja pieniä jälkipainumia voi tapahtua. Massanvaihdon jälkipainumat ovat yleensä melko hyvin korjattavissa.

Jos massanvaihdon alle jätetään pehmeitä maakerroksia eli tehdään osittainen massanvaihto, minimoidaan täyttömateriaalin valinnalla sekä suodatinkankaan käytöllä riski, että täyttömassat painuvat epätasaisesti pohjamaahan suunnitellun massanvaihtosyvyyden alapuolelle.

Pohjaantäytötkin ovat yleensä onnistuneet. Epäonnistumisen riskiä kasvattaa suuri täyttösyvyys, täytön alarajan epämääräisyys, syrjäytettävien maakerrosten leikkauslujuuden vaihtelu taikka silttisyydestä aiheutuva nopea konsolidoituminen työn ollessa kesken. Riskejä voidaan pienentää mahdollisimman perusteellisella poiskaivulla, riittävän korkean murtoylipenkereen käytöllä, räjäytyksillä sekä pohjaantäyttötyön jälkeisellä esikuormituksella ylipengertä käyttäen.

Epäonnistuneissa pohjaantäytöissä voi esiintyä jälkipainumia, jotka ovat osin konsolidaatiopainumia ja osin plastisia muodonmuutoksia ja sivusiirtymiä. Niiden perusteellinen korjaaminen voi vaatia täytön leventämistä, penkereen alle jääneiden pehmeiden maakerrosten syrjäyttämistä räjäyttämällä tai täytön pudotustiivistämistä, mutta useimmiten ko. painumat hidastuvat ja loppuvat ajan myötä. Penkereen tasoittaminen päällysteellä on pohjaantäytöissä niin pieni lisäkuorma, ettei se yleensä kiihdytä painumia.

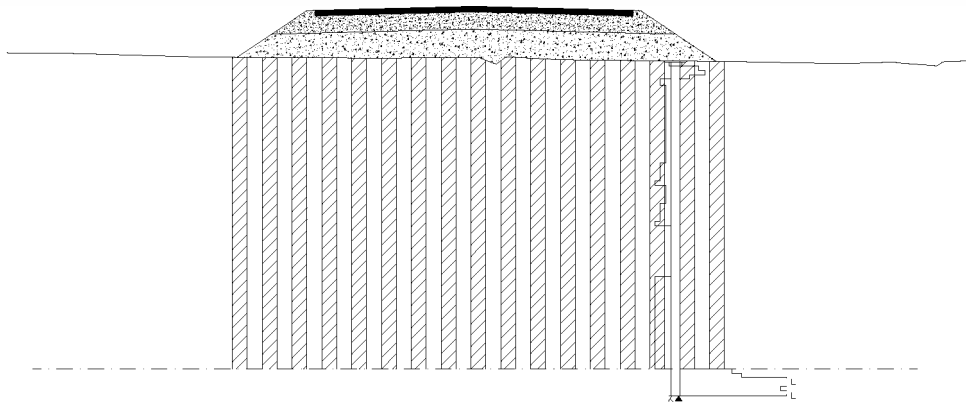
### 3.1.7 Syvästabilointi

Syvästabiloinnissa heikosti kantavaa maapohjaa lujitetaan sekoittamalla maahan sideainetta. Tavallisimpia sideaineita ovat nykyisin kalkin ja sementin seokset sekä kalkin, sementin ja teollisuuden sivutuotteiden seokset.

Yleisimmin käytetään pilaristabilointia. Pilarien halkaisija on nykyisin tavallisesti 600-800 mm. Nykyisellä kalustolla pystytään tekemään 18–20 m pilareita, mutta maksimia lähentelevät pilaripituudet ovat melko harvoin teknistaloudellisesti edullisia, vaan kustannukset nousevat, luonnollisesti pengerkorkeudesta riippuen, usein samaan suuruusluokkaan paalulaattarakenteen kanssa. Pilaristabiloinnin luontevin käyttöalue on matalahkojen penkereiden perustaminen savipehmeiköillä, ks. kuva 11.

Massasyvästabilointi on 1990-luvulla kehitetty menetelmä, jossa sideaine sekoitetaan maahan moneen suuntaan liikkuvalla sekoittimella, jolloin pyritään muodostamaan yhtenäinen stabiloitu vyöhyke. Massasyvästabilointia on käytetty paitsi savimyös turvepehmeiköillä. Nykyisillä koneilla massasyvästabiloinnin maksimisyvyys on noin 5 metriä.

Syvästabilointi parantaa penkereen vakavuutta huomattavasti ja pienentää painumia taikka useimmissa tapauksissa poistaa käyttövaiheen painumat kokonaan.



Kuva 11. Syvästabilointi pilareilla

Syvästabilointi suunnitellaan noudattaen Liikenneviraston ohjetta Syvästabiloinnin suunnittelu 11/2010.

#### Varmistettavat asiat

Syvästabilointia varten tarvittavat lopulliset pohjatutkimukset ovat varsin erilaiset mm. seuraavissa eri tapauksissa:

- Kimmoiset pilarit ulotettuina painuvien kerrosten alarajaan.
- Myötävät pilarit.
- Määrämittaiset pilarit.

Stabiloidun maan lujuuden selvittäminen on kaikissa tapauksissa oleellisin tutkimusten kohde, mutta maakerrosten lujuuden ja painumaominaisuuksien sekä maakerrosten paksuuden vaihtelun selvittämistarkkuudelle asetettavat vaatimukset ovat eri tapauksissa erilaisia. Kun lopullinen ratkaisu ei ole selvillä, pohjatutkimuksissa on varauduttava kaikkiin kyseisessä tapauksessa teknistaloudellisesti mahdollisiin ratkaisuihin.

Kun kimmoiset pilarit ulotetaan painuvien kerrosten alarajaan ja kyseinen kerrosraja on selväpiirteinen (esimerkiksi saven alla suoraan moreeni), pilaripituuden määrittäminen onnistuu vähimmillä kairauksilla. Jos pilarien tavoitetaso on sellainen maakerrosraja, jota ei toteutusvaiheessa pystytä riittävän varmasti tunnistamaan, tarvitaan enemmän kairauksia, kun halutaan estää pehmeän saven alapuolisen siltin tai ylikonsolidoituneen saven tarpeeton stabilointi. Riittävien tutkimusten perusteella pilareille voidaan suunnitelmassa määrätä tavoitetasot tavanomaisesti useimmiten käytetyn ”ulotetaan saven alarajaan” sijasta. Varsinaisia määrämittaisia pilareja käytettäessä tarvitaan tarkkoja pohjatutkimuksia pilarien alapuolelle jätettävien maakerrosten painumaominaisuuksista ja niiden vaihtelusta epätasaisten painumien välttämiseksi. Tässä voidaan CPTU-kairauksella saada hyödyllistä lisätietoa. Tarvitaan usein myös erityisen tarkkoja peruskairauksia (paino- tai puristinheijarikairauksia) sen varmistamiseksi, ettei painuvan savikerroksen paksuuden vaihtelu tee jollain kohdalla osaa pilaroinnista täysin painumattomaksi.



Maakerrosten painumaparametrien merkityksestä voidaan todeta:

- Kimmoisten pilarien tapauksessa esikonsolidaatiojännitys (jos mahdollista ylikonsolidaatiota aiotaan hyödyntää pilaroinnin mitoituksessa) on tärkein ja muiden parametrien merkitys pienempi, koska joka tapauksessa suurin osa kuormasta menee pilarien kannettavaksi.
- Myötäävien pilarien tapauksessa muidenkin parametrien merkitys kasvaa.
- Määrämittaisia pilareita käytettäessä tarvitaan tarkimpia tietoja ja nimenomaan vaikeimmin tutkittavista savikerrosten alaosista.

Stabilointia mahdollisesti vaikeuttavat täytemaakerrokset on selvitettävä. Maakerrokset, joita ei pilarointikoneen terällä voida läpäistä, on kaivettava pois ennen stabilointityötä.

#### **Pohjatutkimussuositukset tiesuunnitelman laatimista varten**

Pohjarakennusmenetelmän valintaa varten tehtyjä tutkimuksia täydennetään tarvittavassa määrin, että tunnetaan stabiloinnilla saavutettava lujuus. Luotettavin lujuustieto saadaan koepilaroinnilla tai aivan lähettyvillä samassa geologisessa muodostumassa aikaisemmin tehtyjen stabilointien toteutumatiiedoista ja myös laboratoriokokeet ovat usein riittävät.

Saven lujuus- ja painumaominaisuudet ovat usein tiesuunnitelmatason mitoituksia varten riittävät pohjarakennusmenetelmän valintaa varten tehtyjen tutkimusten perusteella.

Stabilointia mahdollisesti hankaloittavat täytöt on selvitettävä.

#### **Ratkaisun riskit**

Tiepengerten perustamiseen käytetyt syvästabiloinnit ovat melkein aina onnistuneet. Käyttövaiheen aikaisia epätasaisia painumia on tietävästi kahdessa tapauksessa tapahtunut työvirheiden takia hyvin pehmeissä pohjasuhteissa. Näistä tapauksista toisessa (sideaineen syöttöhäiriöitä syvien pilarien alaosissa) haitalliset painumat lakkasivat yhden korjauksen jälkeen ja toisessa (pilarien yläosien pahoja vajavaisuuksia, ”reikiintymistä”) ne ovat vähitellen lieventyneet. Myötääviä pilarointeja on Suomessa käytetty hyvin harvoin. Niistä ei ole kielteisiä kokemuksia, mutta ei ole myöskään varmuutta, ovatko myötääviksi suunnitellut pilarit myödanneet vai ovatko ne tavoitelujuuden ylityksen takia toimineet käytännössä kimmoisina.

Sivukaltevassa maastossa syvästabiloinnin epäonnistuminen saattaa tavallisia olosuhteita helpommin vaarantaa vakavuuden. Käytännön kokemuksia epäonnistumisista ei ole, vaan edellä mainittu perustuu teoreettisiin tarkasteluihin.

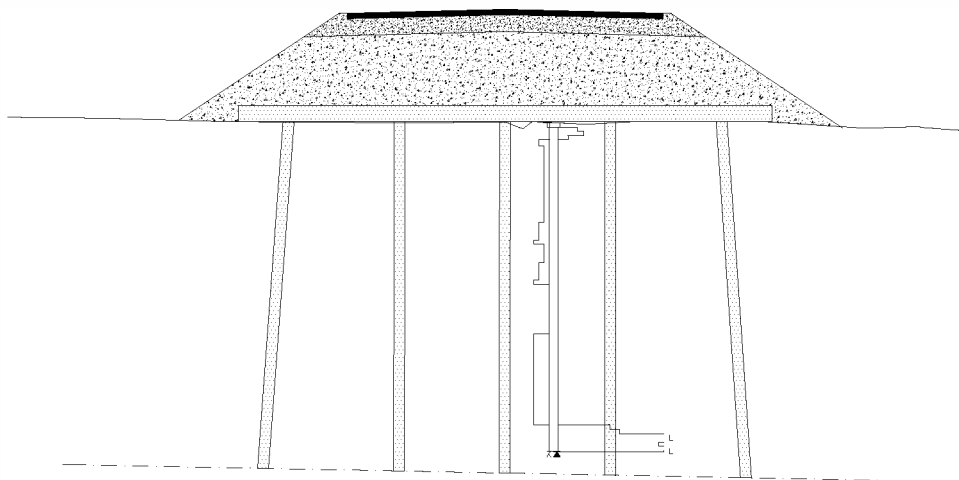
Määrämittaisia pilarointeja on käytetty lähinnä siirtymärakenteissa, joissa ratkaisu on osoittautunut lupaavaksi. Muut käyttökokemukset ovat vähäisiä.

Useissa kohteissa on aiheutunut työnaikaisia hankaluuksia (lähinnä lisäkaivua) puutteellisesti selvitetystä täytemaakerroksista, joita ei ole pilarointikoneen terällä voitu läpäistä. Jos täyttö on niin paksu, ettei sitä voida kaivaa pois, syvästabilointi voidaan joutua korvaamaan muilla ratkaisuilla.

### 3.1.8 Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet

Paalulaatta- ja paaluhatturakenteissa (ks. kuva 12) pengerkuorma siirretään paalujen välityksellä kantaviin maakerrokseen. Kuorma välitetään paaluille joko yhtenäistä laat-  
taa tai paaluhattuja käyttäen. Puupaaluja ei nykyisin käytetä pysyvissä rakenteissa penkereiden perustamiseen.

Tyypillisiä paalulaatta- ja paaluhatturakenteiden käyttökohteita ovat korkeahkot penkereet silloin, kun esimerkiksi massanvaihto ei onnistu maakerrosten paksuuden tai työssä varottavien viereisten rakenteiden takia. Paalulaatta- ja paaluhatturakenteita käytetään usein myös paaluilla perustettavien siltojen tms. rakenteiden läheisyydes-  
sä. Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet ovat yleensä rakennuskustannuksiltaan kallia-  
ta menetelmiä.



Kuva 12. Paalulaattarakenne

Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet suunnitellaan Liikenneviraston ohjeen 5/2014 Paalulaatat ja paaluhatturakenteet mukaan.

#### Varmistettavat asiat

Paalulaatta- ja paaluhatturakenteiden kustannuksiin vaikuttaa merkittävästi paalu-  
pituus. Paalulaattarakenteessa laatan osuus kustannuksista on kuitenkin yleensä  
suurempi kuin paalujen.

Tukipaaluna toimivan lyöntipaalun tunkeutumissyvyys määritetään yleensä heijari-  
kairausten perusteella, jolloin on useimmiten oletettu paalujen tunkeutuvan heijari-  
kairausten päättymissyvyteen.

Painokairaus on paalupituuden määrittämiseen selvästi heijarikairausta epäluotetta-  
vampi menetelmä, mutta painokairauksen tunkeutumissyvyys kertoo kuitenkin paa-  
lupituuden minimiarvon. Kun maakerrostumat ovat sellaiset, että heijarikairausten ja  
painokairausten tunkeutumissyvytydet ovat lähellä toisiaan ja mieluiten vielä pora-  
konekairauksella varmistettu kallionpinta lähellä kairausten päättymissyvyttä, pai-  
nokairauksillekin voidaan paalupituuden määrittämisessä tapauskohtaisesti antaa  
painoa ja näin vähentää heijarikairaustarvetta.

Heijarikairaustiheyttä harkittaessa voidaan ottaa huomioon seuraavia näkökohtia:

- Heijarikairausmetri maksaa keskimäärin hiukan vähemmän kuin 250 mm \* 250 mm teräsbetonipaalumetri. Tätä voidaan käyttää hyväksi verrattaessa yhtä heijarikairausta kohti lyötävää paalumäärää.
- Paalupituuden arvioinnissa taloudellisen optimin on aiemmin arvioitu olevan lähellä sitä, että 90 %:ssa paaluista jää lyhyt ”kanto” ja 10 % paaluista ”sukeltaa”. Nykyisin pyritään yleensä tiukemmin välttämään ”sukeltavien” paalujen aiheuttamaa ylimääräistä työvaihetta.
- Kun paalupituus on paalujen jatkamistarpeen rajoilla (noin 15 m), tutkimustarkkuusvaatimukset kasvavat jatkostarpeen arviointitavoitteiden takia.
- Kun paalupituus tavallista pienempi (alle 5m), tutkimustarkkuusvaatimukset ovat suurimmat.

Porakonekairausta käytetään paalupituuksien määrittämisessä:

- Haettaessa paalupituuden maksimiarvoa erityisesti suurissa paalutuskohteissa, joissa saavutettava säästö on merkittävä.
- Erityisen vaikeissa olosuhteissa esimerkiksi paalujen tukeutuessa vinoon kallionpintaan.

Paalulaatta sijoitetaan yleensä maanpinnan tuntumaan. Jos maapohja on ylikonsolidoitunutta, voidaan laatta sijoittaa ylemmäs penkereeseen, jolloin saadaan säästöä. Tätä varten tarvitaan ödometrikokeita. Jos paalulaatan alapuolinen vakavuus on riittämätön (esimerkiksi sillan tulopenkereessä), laatta joudutaan sijoittamaan maanpintaa alemmas tai joudutaan tekemään lisätoimenpiteitä vakavuuden varmistamiseksi. Vakavuustarkasteluja varten tarvitaan tiedot maakerrosten lujuudesta. Negatiivisen vaippahankauksen tarkastelemiseen tarvitaan ödometrikokeita.

On tarkistettava, aiheutuuko paalutukseen erityisiä työtekniisiä vaikeuksia maakerrosten kivisyydestä tai lohkaraisuudesta, kaltevasta kallionpinnasta, paalutuskaluston vaikeasta liikkumisesta tai paalulaatan vaikeasta rakennettavuudesta. Kalliokärkien tarve on selvitettävä.

Paalutuksen ympäristövaikutukset (vaikutus paineelliseen pohjaveteen, maakerrosten häiriintyminen, huokosvedenpaineen nousu, tärinä) ja niiden minimointi voivat vaatia pohjatutkimuksia.

#### **Pohjatutkimussuositukset tiesuunnitelman laatimista varten**

Pohjarakennusmenetelmän valintaa varten tehtyjä tutkimuksia täydennetään tarvittavassa määrin, että paalulaatta- tai paaluhatturakenteen ulottuvuus ja korkeustaso voidaan määrittää, paalutyypin (tavanomainen teräsbetonipaalu, mahdollisten hankalasti läpäistävien täytemaakerrosten takia esimerkiksi porapaalu, mahdollisten sähköjohtojen takia lyhyinä pätkinä lyötävä taikka porattava teräspaalu) voidaan valita ja paalupituus tunnetaan riittävän tarkasti.

## Ratkaisun riskit

Paalulaattarakenne on varsin varma ratkaisu.

Paaluhatturakenne on epäonnistunut joissain sellaisissa kohteissa, joissa maapohja on erityisen pehmeä ja nykykäsityksen mukaan paalulaatta olisi ainoa oikea ratkaisu ja paaluhattujen peittävyys on ollut nykykäsitystä pienempi.

Monissa epäonnistuneissa paaluhatturakenteissa (lähinnä 1960–70-luvulla tehdyissä) on ollut seuraavia piirteitä:

- Maaperä on turvetta, liejua tai hyvin pehmeää savea (nykyohjeiden mukaan pitäisi käyttää paalulaattaa).
- Pengerkorkeus on pieni.
- Paaluhatut on suunniteltu maanpintaan, mutta on ollut pakko tehdä työalusta ja tällöin paaluhattujen alla on ollut painumia aiheuttava täyttö ja penkereen alle on muodostunut tyhjätila.
- Paaluhatut ovat alkaneet kallistua jo työn aikana.
- Edellä kerrotun seurauksena myös pengerkorkeus on jäänyt suunniteltua pienemmäksi, mikä on edelleen heikentänyt rakenteen toimintaa.
- Liikennekuorma on otettu huomioon nykykäsitystä pienempänä.
- Paaluhattujen peittävyys on ollut nykykäsitystä pienempi.
- Painumaa on huonolla menestyksellä yritetty korjata päällysteellä.

Puupaalujen lahoamisesta aiheutuneita vaurioita on todettu erityisesti jokisiltojen tulopenkereissä (usein toistuvaa kastumista ja kuivumista). Vastaavaa on tapahtunut myös uomansiirtojen yhteydessä, kun vanhan uoman kohta on täytetty vettä johtavalla materiaalilla.

### 3.1.9 Pehmeikkösillat

Suurilla pengerkorkeuksilla silta voi olla edullisempi kuin paalulaattarakenne, erityisesti tien ollessa kapea. Pehmeikkösillan etuina on myös pienempi tilantarve, jolla on merkitystä erityisesti taajama-alueilla, sekä ulkoilijoiden ja eläinten vapaa liikkuminen maastossa tien poikkisuunnassa. Pehmeikkösillan kunnon tarkkailu on helpompaa kuin penkereen alla olevan pohjarakenteen.

### 3.1.10 Ratkaisujen yhdistelmät

Seuraavassa käsitellään erilaisten perustamistapojen tunnettuja yhdistelmiä. Yhdistelmällä tarkoitetaan tässä eri menetelmien yhdistämistä samalla kohdalla toimiviksi eikä tien pituus- tai poikkisuuntaista perustamistavan vaihtamista ja siirtymärakennetta.

Vastapenger ja esikuormitus voidaan usein yhdistää.

Pystyjojitukseen yhdistetään aina esikuormitus, lähes aina ylipengertä käyttäen. Myös vastapenkereitä käytetään useimmissa tapauksissa. Pystyjojitusta voidaan täydentää pengerkevennyksellä, mutta tämä on tuntuva kustannuslisäys ja kevennyksen käyttäminen esimerkiksi lyhyen kuormitusajan kompensoimiseksi ei ole toiminut toivotulla tavalla.

Pengerkevennykseen yhdistetään usein lujite parantamaan penkereen reunaosan vakavuutta.

Lujitteita käytetään usein muiden menetelmien yhteydessä, ks. kohta 2.1.5.

Osittaiseen (syvyys- tai leveyssuunnassa) massanvaihtoon voidaan joskus yhdistää kevennys. Esimerkki tällaisesta ratkaisusta (myös vastapenger) on esitetty liitteessä.

Syvästabilointiin voidaan yhdistää vastapenger, kun halutaan parantaa ”alkutilanteen” (ilman stabilointia) vakavuutta. Esikuormituksella voidaan myötäävän syvästabiloinnin yhteydessä varmistaa painumien tapahtuminen rakentamisaikana. Pengerkevennys syvästabiloinnin yhteydessä on teknisesti täysin mahdollinen ratkaisu, mutta varsin useissa tapauksissa paalulaattarakenne on taloudellisesti sen kanssa hyvin kilpailukykyinen. Syvästabilointiin on joskus yhdistetty matala massanvaihto, jos pinnassa on esiintynyt esimerkiksi turvekerros, jonka stabiloituvuus on ollut selvästi huonompi kuin alapuolisen maan eikä massasyvästabilointikaan ole ollut teknis-taloudellisesti mielekäs ratkaisu.

### 3.1.11 Meluvallien perustamistavat

Meluvallien erikoispiirteitä tavallisiin tiepenkereisiin verrattuna ovat:

- Vallin huippu on kapea.
- Liikennekuormaa ei ole.
- Painumat saavat joskus olla melko suuret, kunhan ne eivät huononna melun-torjuntavaikutusta alle suunnitelmassa esitettyjen vaatimusten taikka vaikuta haitallisesti vallin päälle mahdollisesti tehtäviin aitarakenteisiin.
- Painumaa voidaan helposti ennakoida esikorotuksella.

Meluvallit perustetaan usein ilman erikoistoimenpiteitä. Jos tämä ei vakavuuden kan-nalta ole mahdollista, vallia on useimmiten mahdollista keventää riittävästi. Vallin korkeimman kohdan kapeus helpottaa ratkaisun saamista taloudelliseksi. Melu-valleissa käytetään kevennysmateriaalina ehkä yleisimmin rengasrouhetta. Myös ke-vytsoraa käytetään. Meluvallien perustamistapa on sovitettava yhteen tien perusta-mistavan kanssa.

Meluvallien perustamistapana käytetään joskus myös syvästabilointia tai massan-vaihtoa, erityisesti tarvittavan massanvaihdon ollessa matala. Massanvaihdon tarvit-tava leveys voidaan usein mitoittaa pelkän vakavuuden perusteella, kun perustamis-tavan rajasta aiheutuva poikittainen painumaero ei ole vallissa haitallinen.

## 3.2 Painumatarkastelut

### 3.2.1 Painumatarkastelut ratkaisun valintaa varten

Perustamismenetelmän valintaa varten ja ylipäänsä perustamistoimenpiteiden tar-peellisuuden arviointia varten lasketaan, kuinka suuria painumat olisivat, jos tie-penger perustettaisiin maanvaraisena ilman erikoistoimenpiteitä.

Tiepenkereen vakavuus on tarkistettava ennen painumalaskelmien aloittamista. Varmuusluvun sortumaa vastaan on oltava vähintään Eurokoodi 7:n, sen kansallisen liitteen (LVM-liitteen) ja soveltamisohjeen NCCI 7 mukainen. Muussa tapauksessa painumalaskelma ei ole mielekäs, koska perustamistoimenpiteitä tarvitaan joka tapauksessa eikä olla kimmoteoriaan perustuvien painumalaskentamenetelmien voimassaoloalueella.

Painumatarkastelut aloitetaan laskemalla primäärinen konsolidaatiopainuma. Laskelmaan ei ole tarpeen ottaa mukaan ylikonsolidoituneen alueen painumaa. Sekundääripainuman huomioonottaminen tarkastellaan tarvittaessa erikseen.

Painumatarkastelut aloitetaan tavallisesti laskemalla painuman maksimiarvo ja painumanopeus pohjasuhteiltaan heikoimmalla kohdalla. Tämän jälkeen tehdään alustavia arvioita, ovatko painumat jäämässä edes lähelle hyväksyttäviä raja-arvoja. Jos painumat jo tässä vaiheessa vaikuttavat selvästi liian suurilta, ei painumatarkasteluja kannata tihentää. Muussa tapauksessa painumalaskelmia tihennetään, esimerkiksi seuraavasti:

- Lasketaan painumat muidenkin ödometrikoepisteiden kohdalla.
- Määritetään ödometrikoepisteiden perusteella korjauskertoimet vesipitoisuuteen perustuville likimääräisille painumalaskentamenetelmille ja lasketaan näitä korjauskertoimia käyttäen painumat muiden näytepisteiden kohdalla. Tämä menetely toimii suhteellisen hyvin normaalikonsolidoituneilla savikoilla. Maan ollessa ylikonsolidoitunutta ödometrikokeiden perusteella tehtävä interpolaatio vaatii suurempaa varovaisuutta tehtäessä johtopäätöksiä maan konsolidaatiotilasta ja muista painumaparametreista.
- Interpoloidaan tuloksia muiden pohjatutkimusten perusteella niillä kohdilla, joilla näytetietoja ei ole.

Edellä kuvatun sijasta voidaan painumatarkastelu tehdä sähkövastusluotauksen perusteella jatkuvana. Sähkövastusluotauksen käyttö painumalaskelmiin perustuu saven vesipitoisuusprofiilin tulkintaan ja painumien ja vesipitoisuuden väliseen korrelaatioon. Ennen kyseisen kaltaista erikoistutkimusta kannattaa varmistua siitä, että olosuhteet ovat sellaiset, että tarkastelusta on hyötyä (painumat hyväksyttävän tuntumassa ja erityisesti pituussuuntaiset epätasaisuudet kriittisiä). Pienipiirteisesti vaihtelevalla pehmeiköllä sähkövastusluotauksen tarkkuus ei aina ole riittävä. Tarkempia tietoja menetelmästä on esitetty raportissa Menetelmäkuvaus TPPT 19, Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla.

Sallittavien painumien kriteerejä asetetaan hankekohtaisissa tuotevaatimuksissa tai Liikenneviraston ohjeessa 10/2012 Tien geotekninen suunnittelu mm. seuraavilla perusteilla:

- Sallittu kokonaispainuma tietyn pitkän ajan kuluessa rakentamisen jälkeen.
- Sallittu pituuskaltevuuden muutos vastaavan ajanjakson kuluessa.
- Sallittu poikkikaltevuuden muutos vastaavan ajanjakson kuluessa.

Yleensä kokonaispainuma tulee määrääväksi vain pitkillä pehmeikköosuuksilla. Pituuskaltevuuden muutos on useammin määräävä. On huomattava, että painuma lähes aina on epätasaisempaa, kuin laskelmat näyttävät, sillä painumaominaisuudet vaihtelevat samanlaisilta näyttävienkin kohtien välillä ja pohjasuhteiden muutos tapahtuu

useimmiten jyrkemmin kuin tasaisesti kahden lasketun pisteen välillä. Sallittu poikkikaltevuuden muutos on lähes aina määräävin silloin, kun levennetään nykyistä tietä.

Varsinkin korkealuokkaisilla teillä taikka taajamaolosuhteissa sallitun painuman määrävät useissa tapauksissa muut tekijät kuin ”tie itse ja sen ajettavuus”. Tällaisia tekijöitä voivat olla mm.:

- tiehen liittyvät putkijohdot
- tien pinnan kuivatus (etenkin reunakivellisissä rakenteissa) taikka tierakenteen kuivatus (salaojien toimivuus)
- tiehen liittyvät meluste- tms. rakenteet
- ulkonäköseikat (itse tien ulkonäkö, kaiteet, erityisesti kiveykset tms. pinta-rakenteet).

### 3.2.2 Painumatarkastelujen riippuvuus pohjasuhteista

Painumanopeus on savi- ja silttipehmeiköillä erilainen. Tätä eroa korostaa vielä se, että silttikerrokset käytännöllisesti katsoen aina ovat hyvin epähomogeenisia (kerralisia ja kerroksellisia), jolloin pystysuuntaiseen huokosveden virtaukseen perustuvat teoriat eivät päde. Silttipehmeiköillä painumanopeuden määrittäminen on näin ollen enemmän kokemuseräistä ja paikallistuntemukseen perustuvaa kuin laskennallista.

Silttipehmeiköillä yleensä hyvin suuri osa painumista ja usein koko painuma on mahdollista saada tapahtumaan rakentamisaikana. Tämä voidaan usein ottaa huomioon painumaparametrien määrittämisessä valittaessa. Tällöin rakentamisaikaisten tarkkailumittausten merkitys on suuri.

### 3.2.3 Eri tavoilla perustettavien penkereiden painumien vertailu

Eri tavoilla perustettavien penkereiden käyttäytyminen on hyvä tuntee, koska painumien luonne voi olla hyvin erilainen.

Paalulaattarakenteet ovat painumaton. Paaluhatturakenne on onnistuneena painumaton, mutta epäonnistuneissa hattupaalutuksissa, ks. kohta 3.1.8, voi esiintyä hallitsemattomia epätasaisia painumia, joiden tasoittaminen päällysteellä ei liene koskaan onnistunut. Sekä paalulaattarakenteen että paaluhatturakenteen melko vähäinenkin painuma on aina merkki siitä, että rakenteen toiminnassa on jotain pahasti vialla.

Kimmoisiksi mitoitetuissa syvästabiloinneissa tapahtuu rakentamisaikana vähäistä painumaa, joka on käytännöllisesti katsoen välitöntä. Myötävissä pilaroinneissa tapahtuu myös pilareita ympäröivän saven konsolidaatiopainumaa, jonka pilareiden pystyjoamainen vaikutus nopeuttaa rakentamisaikana muutamassa kuukaudessa tapahtuvaksi.

Määrittämissä syvästabiloinneissa esiintyy käyttövaiheen aikaista pilareiden alapuolisen saven konsolidaatiopainumaa, jonka erikoispiirteensä on painumanopeuden tavallista huonompi ennustettavuus savikerrostumien epähomogeenisissa alaosissa.

Pystyjoitukselle perustettujen penkereiden pienetkin jälkipainumat ovat erityisen haitallisia, koska ne tapahtuvat nopeutetusti. Niiden korjaaminen on myös hankalaa.

Massanvaihto kaivamalla on yleensä käytännöllisesti katsoen painumaton. Pieniä jälkipainumia voi tapahtua työvirheiden (pienää puutteellisuutta poiskaivussa taikka vaikeissa olosuhteissa tiivistystyön puutteita) vaikutuksesta. Jälkipainumat ovat yleensä helposti päällysteellä korjattavia.

Pohjaantäytöissä jälkipainumien riski on suurempi kuin massanvaihoissa kaivamalla. Pohjaantäytöjen jälkipainumat ovat usein yhdistelmä konsolidaatiopainumaa ja plastisia muodonmuutoksia. Ne ovat yleensä helposti päällysteellä korjattavissa.

Kevennetyn penkereen taikka esikuormitetun penkereen mahdolliset jälkipainumat ovat periaatteessa samankaltaista normaalia konsolidaatiopainumaa kuin maanvaraisen penkereen. Kevennetyn penkereen painumien tasoittaminen päällysteellä on usein vain lyhytaikaisen hyödyn antava ratkaisu, etenkin jos pengerrin on yritetty mitoitaa painumattomaksi mutta tässä on epäonnistuttu.

Kuten edellä esitetystä havaitaan, penkereen käyttövaiheen painumia voidaan arvioida seuraavilta näkökannoilta:

- Laskennallinen jälkipainuma.
- Laskennallisen jälkipainuman määrityksen erehtymisriski.
- Toteutusvirheistä aiheutuvien painumien riski.
- Painumien korjattavuus.

Menetelmiä ei periaatteessa voida ”pisteyttää” yleispätevään paremmuusjärjestykseen, sillä esimerkiksi eri lailla mitoitettujen syvästabilointien taikka eripaksuisiksi mitoitettujen pengerrinkevennykset eivät ole käyttöaikaisten painumien taikka toteutusvirheiden riskin taikka käyttöaikaisten yllättävien olosuhdemuutosten kannalta samanarvoisia, vaan riskitarkastelu pitäisi tehdä tapauskohtaiset olosuhteet huomioon ottaen.

## 3.3 Tiepenkereen levennyksen perustamistavan valinta

### 3.3.1 Yleistä

Pengerrin levennettäessä ensisijainen tarkasteltava vaihtoehto on perustaa levennys samalla tavalla kuin vanha pengerrin. Kun olosuhteet edellyttävät, tarkastellaan kuitenkin ennakkoluulottomasti myös muita vaihtoehtoja, joilla haitalliset poikittaissuuntaiset painumaerot mahdollisesti paremmin vältetään taikka hyvin pienen levennyksen kohdalla voidaan sallia.

Levennyksen suunnittelun alkuvaiheessa tarkastellaan tien nykyiset sivukallistukset, niiden mahdolliset muuttamistarpeet ja levennysosan sivukallistukset. Lisäksi tarkastellaan mahdollisten tulevien painumien vaikutus sivukallistuksiin sekä tarvittaessa myös kokonaisviertokaltevuudet pintakuivatuksen toiminnan varmistamiseksi. Levennyksen perustamisratkaisujen valintaan voi merkittävästi vaikuttaa, muuttavatko tulevat painumat kallistuksia huonontavasti vai parantavasti. Levennystapauksissa voidaan sivukallistuksia tarpeen vaatiessa ennakoivasti tehdä tavoitearvoa hieman suurempina tai pienempinä.



Levennyksen suuruus otetaan huomioon vähintään sillä tarkkuudella, tuleeko pahin odotettavissa oleva painumaepätasaisuus ajoradan vai pientareen kohdalle. Pientareen kohdalla voidaan sivukaltevuuden muutosta harkita sallittavaksi enemmän kuin ajokaistan kohdalla. Epäedullisinta on, jos pahin odotettavissa oleva painumaepätasaisuus sattuu ajokaistan todennäköisen rengasuran kohdalle.

Tiepenkereen leventämiseen liittyviä pohjatutkimuksia on käsitelty kappaleessa 2.5.

### 3.3.2 Maanvaraisen penkereen leventäminen

Maanvaraisen penkereen leventämistä pehmeikköalueella hankaloittaa vanha penger, jonka alla maapohja on konsolidoitunut eri lailla kuin tulevan levennyksen kohdalla.

Kaikissa tapauksissa on tarpeellista selvittää nykyisen penkereen painumatila. Oletus, että vanhan penkereen painumat ovat jo kokonaan tapahtuneet, kelpaa monissa tapauksissa likimääräistarkastelujen lähtötiedoksi, mutta voi johtaa epävarmalla puolella oleviin ratkaisuihin, jos levennys perustetaan painumattomaksi tai jokseenkin painumattomaksi. Nykyisen penkereen painumahavainnot ovat arvokkaita ja niistä saadaan luotettavaa ja hyödyllistä tietoa, kun ne käynnistetään useita vuosia ennen suunnittelun (tiesuunnitelman laatimisen) aloittamista. Mittaukset tehdään hyvään tarkkuuteen pyrittäessä tiehen kiinnitetyistä painumanastoista. Laserkeilauksen käyttö samaan tarkoitukseen on kehitteillä, mutta on harkittava, mihin tapauksiin sen tarkkuus riittää. Nykyiseksi tarkkuudeksi on mainittu  $\pm 15$  mm.

Maanvaraisen penkereen leventäminen maanvaraisena edellyttää, että lasketaan poikkisuuntaiset painumaerot ja ne todetaan hyväksyttävän pieniksi. Tärkeää on kiinnittää huomiota myös siihen, muuttuvatko sivukaltevuudet (sekä eri lailla käyttäytyvien vanhan penkereen ja levennyksen osalta sekä kokonaisuutena katsoen) painumien vaikutuksesta haitalliseen suuntaan ja voidaanko ennakoivasti suunnitella sivukallistukset tavoitearvoa pienemmiksi taikka suuremmiksi. Painumalaskelmiin sisältyy tavallista suurempia epätarkkuuksia ja on välttämätöntä tarkastella tulosten vaihtelua epätarkkuuksien toteutuessa.

Jos poikkisuuntaiset painumaerot tavanomaisella maanvaraisella perustamisella ovat haitallisen suuret, tarkastellaan seuraavaksi yleensä savipehmeiköillä pengerkevennystä ja silttipehmeiköillä sen kanssa vaihtoehtoisena tai sitä täydentävänä esikuorimitusta.

Jos kevennysratkaisu ei kohtuullisella kevennyspaksuudella onnistu, joudutaan tarkastelemaan muita perustamistapoja, kuten esimerkiksi syvästabilointia. Koska saven alarajaan ulotettava syvästabilointi on käyttötilassa käytännöllisesti katsoen painumaton, vaarana ovat tällöin poikkisuuntaiset pieninäkin haitallisen jyrkät painumaerot.

Määrämittaisen syvästabiloinnin mitoituksessa on kolme erityistä epätarkkuustekijää:

- Painumat tapahtuvat savikerrostuman alaosissa, joiden pohjatutkimukset helposti jäävät epätarkoiksi, sillä toisaalta esimerkiksi edustavien häiriintymättömien näytteiden ottaminen on vaikeinta suurilta syvyyksiltä ja toisaalta savikerrostuman alaosat voivat poiketa muusta savesta erityisesti konsolidaatiotilaltaan ja painumanopeusominaisuuksiltaan.

- 
- Jännitysten täsmällinen jakautuminen maapohjassa yleensäkin määrämittaisen syvästabiloinnin alapuolella, kun vielä lisäepätarkkuutena on syvästabiloinnin epäjatkuvuus sivusuunnassa.
  - Stabilointipilarien vedenjohtavuus, joka perinteisesti on oletettu huomattavasti saven vedenjohtavuutta suuremmaksi, mutta työtekniikan kehitys saattaa muuttaa asiaa, jos pilarien keskelle ei synnykään vettäjohtavampaa kohtaa.

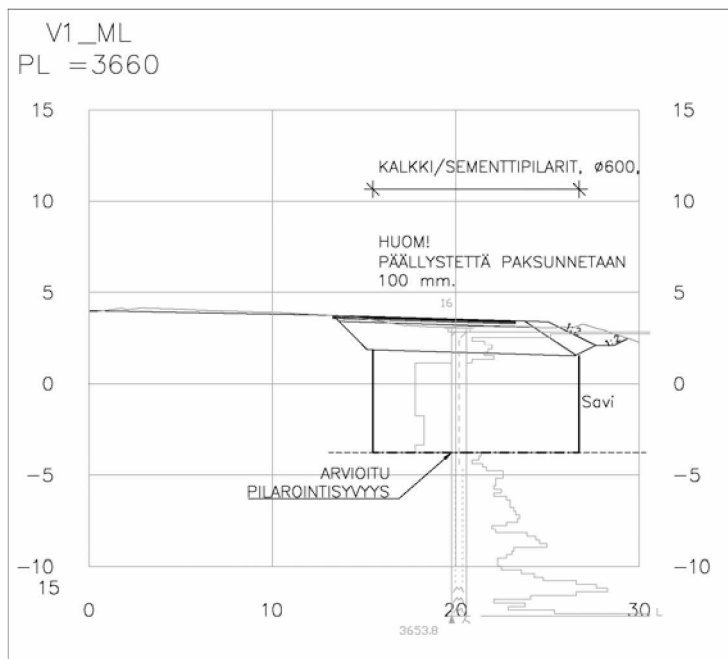
Epätarkkuustekijöistä huolimatta määrämittaista syvästabilointia ei ole syytä liikaa vierastaa silloin, kun ratkaisulla saavutettava laatutaso epätarkkuudet huomioon ottaenkin on parempi kuin vaihtoehtoisilla ratkaisuilla. Erityisesti pitää välttää tien poikkisuuntaista siirtymää maanvaraiselta penkereeltä täyssyvälle syvästabiloinnille, elleivät nykyisen penkereen painumia voida luotettavasti katsoa tapahtuneiksi. Parin pilaririvin jättäminen lievästi määrämittäisiksi ilman tarkempia laskelmiakin on siihen verrattuna parannus. Leveämmän määrämittaisen syvästabilointivyöhykkeen mitoittaminen maanvaraisen penkereen levennyksen kohdalle on hankalampaa, mutta joskus erityisesti syvillä savikoilla sopiva ratkaisu. Jos ratkaisun onnistuminen vaikuttaa liian epävarmalta ja/tai on tarpeita tasauksen nostamiseen esimerkiksi tien pituus-suuntaisten painumanotkojen tasaamiseksi, tulee tarkasteltavaksi myös pohjanvahvistusten tekeminen koko penkereen leveydellä.

Joskus on edullista tehdä jyrkimisen mahdollistava paksunnettu päällyste (esim. 100 mm ylipaksuutta) levennyksen kohdalle, jos on todennäköistä, että se jää muuta tietä painumattommaksi.

Erlaisia todellisiin tilanteisiin pohjautuvia ratkaisuja on esitetty seuraavissa kuvissa.



Kuva 13. Kehä I Vallikallion ja Vihdintien välillä, rakennettu n. 2010. Kehä I rakennettu 1970-luvun lopulla maanvaraisena. Eteläreunan levennys perustettu tavanomaiselle syvästabiloinnille (ajoradan kallistus keskikäistän suuntaan). Pohjoispuolen levennys perustettu määrämittaiselle syvästabiloinnille (kallistus ulospäin). Savikerroksen paksuus on siinä määrin suuri, että määrämittaisen stabiloinnin onnistumista ei pilannut pilarien tuleminen vahingossa painumattomiksi ja ainakaan ensimmäisten vuosien aikana ei ilmennyt haitallisen suurta painumanopeuden erilaisuutta.



Kuva 14. Vt1 Turunväylä, Vermonsolmun eritasoliittymästä Helsinkiin johtava ramppi, rakennettu n. 2010. Moottoritie oli vähien säilyneiden tietojen mukaan 1960-luvulla perustettu hiekkapystyjojitusta käyttäen, tarkempia vanhoja suunnitelmia ei ole tallessa. Ramppilevennys perustettu saven alapintaan ulotetuilla syvästabilointipilareilla. Määrämittaisia (n. 1 m lyhennettyjä) pilareita harkittiin, mutta niitä pidettiin liian riskialttiina ratkaisuna, sillä olisi tarvittu erittäin tarkat pohjatutkimukset sen estämiseksi, että saven paksuusvaihtelun takia osa pilareista ulottuisi saven alapintaan ja aiheuttaisi painumattomia kohtia. Siltä varalta, että moottoritien keskiosan painuma joskus jatkuisi, ramppilevennyksen kohdalla on paksunnettu päällyste, jota voidaan tarvittaessa jyrsiä ohuemmaksi.

### 3.3.3 Kevennetyn penkereen leventäminen

Levennettäessä kevennettyä pengertä kevennystä käyttäen tarvitaan painumaerojen välttämiseksi levennyksen osalle yleensä paksumpi kevennys kuin vanhalle penkereelle. Jos tämä ei pienen pengerkorkeuden takia käy päinsä, tarvitaan muita perustamistoimenpiteitä, esimerkiksi syvästabilointia.

Kevennetyn penkereen leventämisen suunnittelu on vastaavan kaltaista kuin edellisessä kohdassa esitetty maanvaraisen penkereen leventäminen.

### 3.3.4 Pystyjoitusta käyttäen perustetun penkereen leventäminen

Pystyjoitusta käyttäen perustetun penkereen leventäminen on hankalaa, ellei pystyjoitusalueita ole aikanaan esikuormitettu erityisen hyvin ja suorastaan ”ylimitoitettu”. On vaikea estää pystyjoitetulle alueelle syntyviä nopeita lisäpainumia, joita voi aiheuttaa reuna-alueiden esikuormituksen niukkuus, pohjaveden pienikin aleneminen, pienikin tasauksen nosto ja yleensäkin vieressä tehtävän työn vaikutus.

Uuden pystyjoituksen tekeminen ja esikuormittaminen levennyksen kohdalla aiheuttaa yleensä suurehkoja painumia myös vanhan pystyjoituksen reuna-alueilla, joten ratkaisu tulee kysymykseen lähinnä levennettäessä yksiajorataista tietä kaksiajorataiseksi riittävän leveää keskikaistaa käyttäen.

Leventämiskäytösten valinta vaatii perusteellista tapauskohtaista pohdintaa, mutta pieniä levennyksiä voidaan onnistua perustamaan kevennystä käyttäen. Jos tasausta joudutaan korottamaan pystyjoitetulla alueella, varmin ratkaisu on paalulaattarakenne. Syvästabilointia vanhojen pystyjoitusten seassa on tehty ainakin kahdessa kohteessa ja niissä menestyksekkäästi, mutta kohteet ovat olleet suppea-alaisia, vakavuus on ollut joka tapauksessa riittävä ja myös painumamitoitus sellainen, ettei yksittäisen taikka muutamankaan pilarin epäonnistuminen olisi ollut merkittävä riski ratkaisun onnistumiselle.

### 3.3.5 Lujitteita käyttäen perustetun penkereen leventäminen

Lujitteita käyttäen perustettua pengertä levennettäessä lujitetta levennetään käyttäen riittävää limitystä ja tarvittaessa muita toimenpiteitä vanhan ja uuden lujitteen yhdistämiseksi.

### 3.3.6 Massanvaihdolle perustetun penkereen leventäminen

Massanvaihdolle perustettua pengertä levennetään yleensä massanvaihdolla, varsinkin kun vanha massanvaihto on tehty kaivamalla kovaan pohjaan saakka. Työnaikaisten tilanteiden vakavuus on tarkasteltava.

Pohjaantäytön leventäminen varsinkin kapeahkolla pohjaantäytöllä on yleensä teknisesti hankalampaa kuin alkuperäinen pohjaantäyttö ja joskus myös ympäristösyistä hankalaa. Tehtäessä vanhaan tiehen pientä levennystä joudutaan tarkastelemaan, olisiko vanhan pohjaantäytön leveys niin suuri, että levennys olisi toteutettavissa ilman erikoistoimenpiteitä taikka esimerkiksi pengerkevennystä tai esikuormitusta käyttäen.

Syvästabilointi ei massanvaihtojen leventämisessä juuri koskaan tule kysymykseen, koska massanvaihtotäytöt yleensä estävät syvästabiloinnin.

Jos massanvaihtoa kaivamalla tai pohjaantäyttöä joudutaan leventämään paalulaattarakenteella, täyttömateriaalin läpäisy vaikuttaa paalutyypin valintaan. On myös varmistettava, että massanvaihto on jatkossa painumaton.

### **3.3.7 Syvästabiloinnille perustetun penkereen leventäminen**

Syvästabiloinnille perustettua pengertä levennetään yleensä vastaavanlaisella syvästabiloinnilla. Vanhan penkereen vakavuus saattaa kaivutilanteessa riippua vanhasta syvästabiloinnista ja syvästabilointia aloitettaessa vakavuus saattaa vielä saven häiriintymisestä heikentyä. Riittävä vakavuus tarkastellaan tapauskohtaisesti.

### **3.3.8 Paaluhatturakennetta käyttäen perustetun penkereen leventäminen**

Paaluhatturakennetta voidaan usein leventää paaluhatturakennetta käyttäen, jos olosuhteet ovat sellaiset, että paaluhatturakenne nykyistenkin ohjeiden mukaan tulee kysymykseen ja varsinkin levennyksen ollessa pieni.

Levennyksen tekeminen paalulaattarakenteella on perusteltua varsinkin, jos paaluhatturakenteen myöhempi uusiminen vaikuttaa todennäköiseltä. Levennyksen suunnittelun yhteydessä on tällöin aiheellista ainakin alustavalla tarkkuudella tarkastella myöhemmän uusimisen aikaista liikennejärjestelyä.

Kaivannon tekeminen paaluhatturakenteen leventämistä varten aiheuttaa paaluhatturakenteelle rasituksia. Paaluhatturakenteiden leventämistä saattaa hankaloittaa se, että vanhoissa paaluhatturakenteissa paalujen vinous voi olla nykykäytäntöä suurempi. Työnaikaiset tilanteet (kaivannot, työnaikainen liikenne lähellä kaivantojen reunoja, työkoneiden liikkuminen ym.) voivat, jos niitä ei oteta riittävästi huomioon ja/tai paaluhatturakenteen kunto on arvioitua huonompi, aiheuttaa paaluhatturakenteen koko toiminnan vaarantumisen, joten paaluhatturakenteen leventämisen suunnittelussa on alusta asti huolellisesti suunniteltava työnaikaisen liikenteen järjestelyt.

### **3.3.9 Paalulaattaa käyttäen perustetun penkereen leventäminen**

Paalulaattarakennetta levennetään yleensä paalulaattarakenteella. Jos levennys on hyvin pieni ja rajoittuu pientareen alueelle, voidaan joskus harkita muitakin perustamistapoja. Vanhan paalulaattarakenteen mahdolliset vinopaalut on otettava huomioon levennyksen perustamista suunniteltaessa.

## **3.4 Leikkausten vahvistamismenetelmät**

### **3.4.1 Vahvistamismenetelmän valinnan tavoitteet**

Leikkausten vahvistamismenetelmän valinnassa ratkaisevimmat kriteerit ovat:

- leikkausluiskien ja -pohjan riittävä vakavuus sekä kestävyys eroosiota vastaan
- leikkauspohjan hydraulisen murtuman välttäminen
- haitallisten ympäristövaikutusten välttäminen.

Joissain tapauksissa on tarpeen lujittaa leikkauspohjaa kantavuuden lisäämiseksi, pohjamaan häiriintymisen vähentämiseksi taikka jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuvien painumien välttämiseksi. Tähän käytettäviä menetelmiä voivat olla:

- syvästabilointi, usein lyhyilläkin pilareilla
- lujitteet
- massanvaihto.

### 3.4.2 Luiskan kaltevuuden valinta

Luiskan kaltevuus valitaan siltissä, hiekassa ja moreenissa riittävästi maalajin kitkakulmaa loivemmaksi. Kaltevuuden valinnassa otetaan huomioon erityisesti pohjaveden ja huokosvesipaineen vaikutus sekä pintavesierosio. Koheesiomaassa luiskan vakavuus riippuu enemmän kokonaiskorkeudesta kuin kaltevuudesta. Luiskakaltevuus mitoitetaan lyhyt- ja pitkäaikaiselle tilanteelle ja periaatteessa  $c\phi$ -laskelmin.

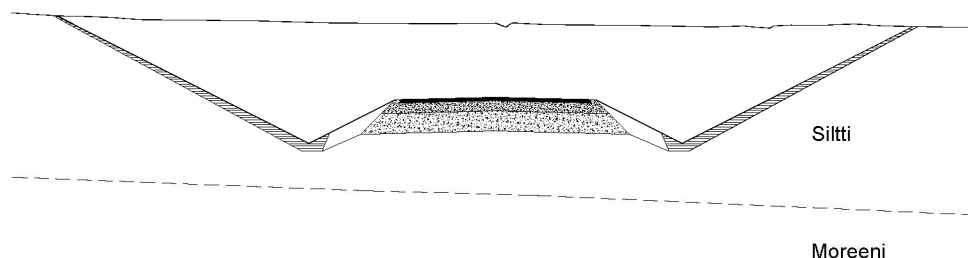
Luiskaverhous (ks. kuva 13) tehdään lähinnä eroosiosuojausta varten. Samalla vakavuus paranee hiukan seuraavista syistä:

- Verhousmateriaalilla parempi kitkakulma ja hiukan suurempi paino kuin pehmeällä pohjamaalla.
- Verhouksen hyvän vedenläpäisevyyden takia huokosveden ylipaine luiskan pintaosassa estyy.
- Verhous ja sen taustalla oleva suodatinkangas estävät pohjavesierosion.
- Suoja myös pintavesierosiota vastaan.

Yleensä verhous tehdään murskeesta, sorasta tai soraisesta hiekasta. Pohjamaan ja verhouksen välissä käytetään nykyisin yleensä suodatinkangasta. Yleensä verhous tehdään alaspäin paksunevaksi ja usein verhous ulotetaan ojanpohjaan.

Yleensä jonkinlainen luiskaverhous tarvitaan ainakin pohjavesipinnan alapuolella siltissä, silttisessä moreenissa, hienossa hiekassa ja usein savessa.

Luiskakaltevuuden valinta ja luiskaverhouksen tarvittava paksuus vaikuttavat toisiinsa. Maaleikkaurakenteen ja erityisesti eroosiosuojauksen suunnittelua on käsitelty Liikenneviraston ohjeessa 9/2010 Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu.



Kuva 13. Luiskaverhous silttileikkauksessa

Leikkausluiskien vakavuuden kannalta useissa tapauksissa kriittisin tilanne on kaivuvaihe seuraavista syistä:

- Luiskaverhoukset ja leikkauspohjalle tehtävät päällysrakennekerrokset ovat keskeneneräisiä tai puuttuvat.
- Kaivutyö on saattanut aiheuttaa maakerrosten häiriintymistä.
- Työkone- tai kaivumassakuormitukset saattavat poiketa suunnitelmassa otaksutuista.

#### **Varmistettavat asiat**

Luiskan kaltevuuden valintaa ja luiskaverhouksen suunnittelua varten tarvitaan tiedot luiskan maakerroksista ja niiden ominaisuuksista sekä pohjavesiolosuhteista. Luiskaverhousten tarve tarkentuu usein työn aikana olosuhteiden selvityksessä tarkemmin.

#### **Ratkaisun riskit**

Luiskakaltevuuden valinta ja siihen kiinteästi liittyvä luiskaverhousten suunnittelu siltti- ja moreenileikkauksissa on usein ”tuntumalla” tapahtuvaa ja tarkkoja laskelmia taikka niiden lähtötiedoiksi tarvittavia tarkkoja pohjatutkimuksia tehdään melko vähän. Tämä on toisaalta sikäli ymmärrettävää, että luiskaverhous tehdään yleensä pienten sortumien ja valumien estämiseksi ja paikoin tapahtuva alimitoitus aiheuttaa siltti- ja moreenileikkauksissa harvoin suuria vahinkoja, kuten savileikkauksissa voi tapahtua. Luiskaverhousten mitoituksen tarkistaminen työvaiheessa tehtävien maalaaji- ja pohjavesihavaintojen perusteella on tärkeää. Luiskaverhouksissa tapahtuu usein virheitä muun muassa työvaiheessa tapahtuvan tarkistamisen puutteellisuuden takia.

#### **3.4.3 Kevennysleikkaus**

Kevennysleikkaus on toimintatavaltaan vastapengertä vastaava vakavuutta parantava menetelmä. Yleensä kevennysleikkaus on kustannuksiltaan edullinen ratkaisu. Sen haittapuolena on tilantarve. Luiskanloivennus on toimintatavaltaan samankaltainen, mutta vähemmän tehokas.

#### **Varmistettavat asiat**

Kevennysleikkauksen mitoitusta varten on selvitettävä maakerrosten lujuusominaisuudet. Suuntaa-antava mitoitus voidaan tehdä  $\varphi=0$ -menetelmällä, mutta tarkistus tulee tehdä  $c\varphi$ -menetelmällä, vähintään arvioituilla parametreilla.

Kevennysleikkauksen tilantarve on määritettävä tiesuunnitelmavaiheessa.

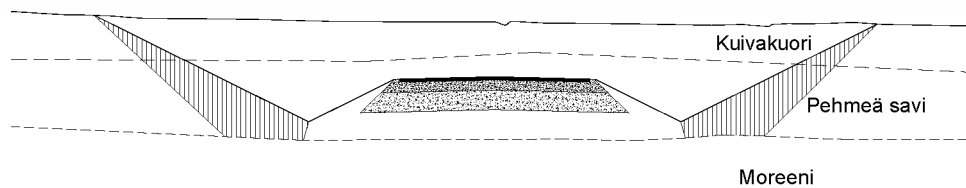
#### **Ratkaisun riskit**

Kevennysleikkaukset ovat yleensä onnistuneet. Suurin virhemahdollisuus liittyy vakavuuslaskentamenetelmän valintaan ja  $c\varphi$ -menetelmässä huokosvedenpaineen oikeaan arviointiin taikka työnaikaisten tilanteiden (maksimaalinen kaivussyvyys, työkonekuormat, häiriintyminen) puutteelliseen huomioonottamiseen. Useissa tapauksissa kevennysleikkaus on pienin lisäkustannuksin mahdollista mitoittaa siten, että varmuustaso on minimivaatimuksia parempi.

### 3.4.4 Massanvaihto luiskassa

Luiskassa tehtävä massanvaihto (ks. kuva 14) on pehmeissä maakerroksissa, kuten savessa, käytettävä menetelmä, kun vakavuutta pitää parantaa runsaasti. Raja paksun luiskaverhouksen ja massanvaihdon välillä on liukuva.

Massanvaihto luiskassa on hyvin monissa tapauksissa kustannuksiltaan kevennysleikkauksen jälkeen edullisin luiskanvahvistusmenetelmä, jos tarvittava massanvaihtosyvyys on kohtuullinen ja massanvaihto rajoittuu selvästi lujempaan maakerrokseen. Menetelmän tehokkuus heikkenee ja kustannukset kasvavat jyrkästi massanvaihtosyvyyden ylittäessä ojanpohjan syvyyden.



Kuva 14. Massanvaihto luiskassa

#### Varmistettavat asiat

Oleellista on määrittää tarvittava massanvaihtosyvyys, sillä se vaikuttaa ratkaisevasti menetelmän tehokkuuteen ja kustannuksiin. On myös selvitettävä massanvaihdon alapuolisten kerrosten maalaji ja lujuus ainakin sillä tarkkuudella, että tiedetään, voivatko vaarallisimmat liukupinnat kulkea massanvaihdon alapuolelta.

Massanvaihtokaivannon riittävän vakavuuden varmistamiseen tarvitaan tiedot pehmeän kerroksen lujuusominaisuuksista.

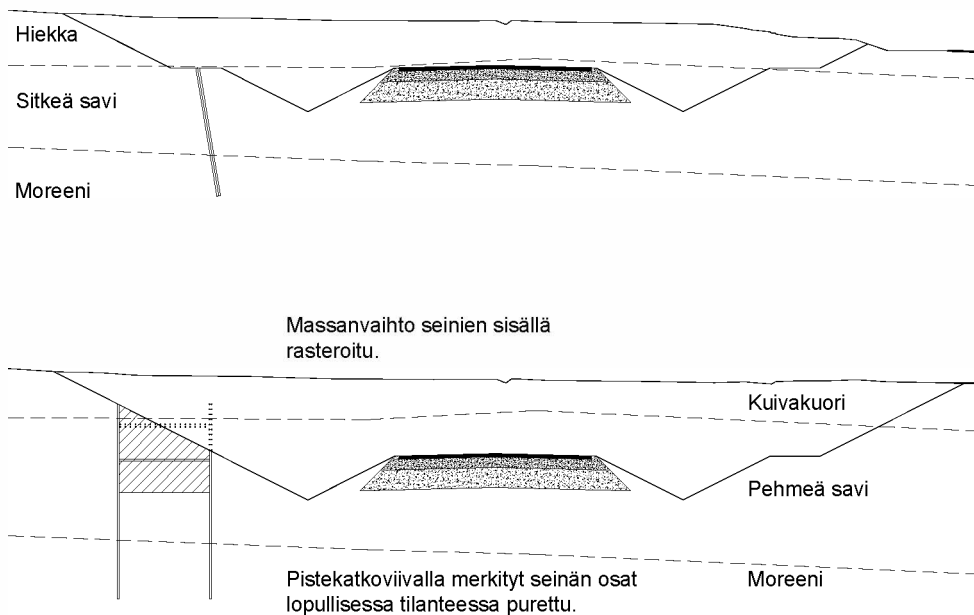
#### Ratkaisun riskit

Suurin riski on, että tarvittava massanvaihtosyvyys olisi arvioitua suurempi ja massanvaihtoa ei pystyittäisi tekemään luotettavasti pohjaa myöten.

### 3.4.5 Tukiseinärakenteet

Pysyvät tukiseinät leikkausluiskan vahvistuksina (ks. kuva 15) ovat melko harvinaisia ja kalliita erikoisratkaisuja, mutta joissain tapauksissa tarpeellisia ja käytännöllisiä. Eri tapauksilla on omia erikoispiirteitään.





Kuva 15. Erilaisia tukiseinärakenteita pysyvinä luiskanvahvistuksina. Ylhäällä ankkuroimaton ponttiseinä ja alempana kaksoisponttiseinä.

### Varmistettavat asiat

Pysyvän tukiseinän suunnittelua varten selvitetään:

- maapohjan lujuusominaisuudet alkutilanteen vakavuuden selvittämiseksi sekä seinän mitoitus varten
- pohjavesiolosuhteet
- korroosion vaikutus seinään
- ulkonäkökysymykset, jos osa seinästä jää näkyviin.

### Ratkaisun riskit

Ankkuroimattoman tukiseinän osalta voidaan todeta:

- Maaperään liittyvistä lähtötiedoista kriittisin lienee pehmeiden kerrosten paksuuden vaihtelu. Myös tiedot maakerrosten lujuudesta ja ponttien tunkeutuvuudesta ovat tärkeitä.
- Jos ankkuroimattomassa tukiseinässä on näkyviin jäävää vapaata korkeutta, mitoitus on varsin herkkä ko. korkeuden vaihtelulle.
- Tukiseinän lievä kallistaminen on edullista maanpaineiden kannalta.

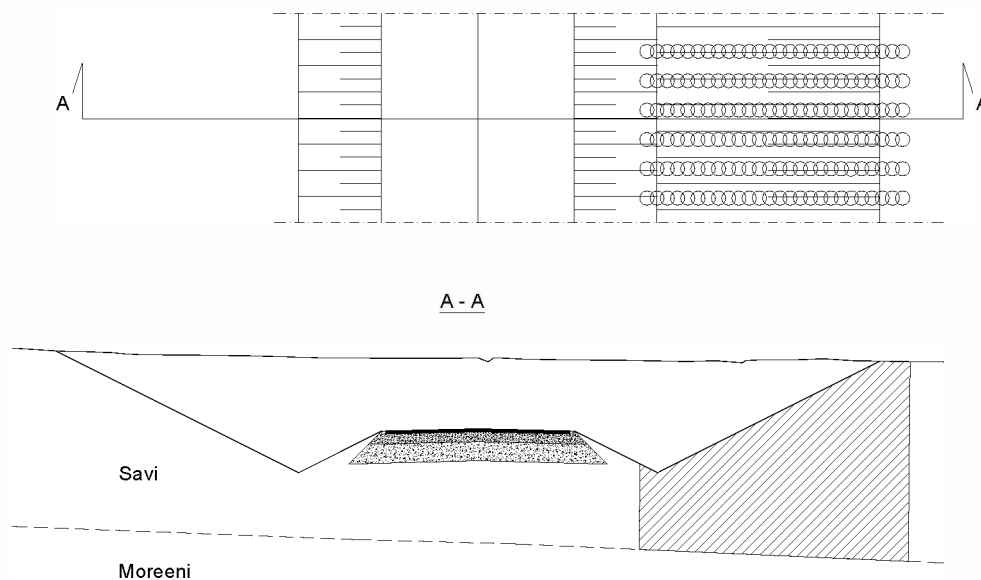
Tien alta toisiinsa tuettuihin tukiseiniin pätevät samat seikat. Lisäksi on todettava, että tuen asentamisvaihe on erityisen mitoitettava. Ratkaisu on mahdollinen vain melko kapeilla teillä ja tuet voivat aiheuttaa tiehen epätasaisuutta. Joskus terästuki on korvattu seinien väliin tehdyllä lamellisvästabiloinnilla.

Kaksoistukiseinän osalta voidaan todeta:

- Mitoittavin tilanne on kaivuvaihe seinien välissä ja se on normaalia tuetun kaivannon mitoittamista.
- Pysyvässä tilanteessa rakenteen rasitukset ovat selvästi pienemmät, joskin työllästi mitoittettavat.
- Tukiseinien välisen etäisyyden kohtuullinen kasvattaminen lisää kustannuksia vain vähän, mutta antaa runsaasti lisää varmuutta pysyvän tilanteen vakavuuteen.

### 3.4.6 Syvästabilointi luiskanvahvistuksena

Syvästabiloinnin heikkous luiskanvahvistuksena on se, että pilarit kestävät varsin heikosti vaakasuuntaisia rasituksia. Nykykäytännön mukaan luiskanvahvistuksissa ei käytetä yksittäisiä pilareita, vaan pilareista muodostetaan luiskan poikkisuunnassa yhtenäisiä rakenteita, ks. kuva 16.



Kuva 16. Syvästabilointi luiskanvahvistuksena

#### Varmistettavat asiat

Luiskanvahvistuksena toimivaa syvästabilointia varten selvitetään:

- maakerrosten stabiloituvuus vielä varmemmin kuin tavanomaisessa syvästabiloinnissa, sillä liukupinnat hakeutuvat heikkousvyöhykkeisiin helpommin kuin tavanomaisissa syvästabiloinneissa
- vastaavasta syystä myös työtä hankaloittavat täytemaakerrokset ym. häiriökohdat tavallista tarkemmin
- maakerrosten lujuusominaisuudet ja lujuuden ja muodonmuutoksen väliset riippuvuudet
- pehmeiden kerrosten syvyys tavallista tarkemmin, koska liukupinnat voivat kulkea pilarien alapään tuntumassa toisin kuin tavanomaisissa syvästabiloinneissa.

### Ratkaisun riskit

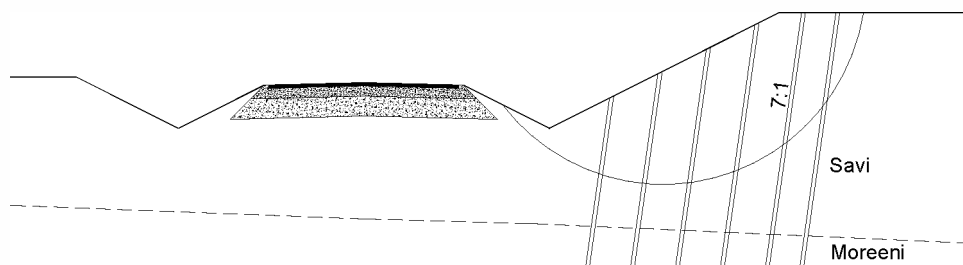
Erillisillä pilareilla stabiloituja luiskia on sortunut edellisessä kohdassa esitettyjen riskitekijöiden toteutumisen johdosta, vaikka kokonaisvarmuusluku sortumaa vastaan on ollut suuruusluokkaa 1,5. Yhtenäisillä seinämillä varustetut luiskat ovat onnistuneet, mutta ratkaisu on usein kallis.

#### 3.4.7 Luiskapaalutus

Luiskapaalutus (ks. kuva 17) on harvinaistunut luiskanvahvistusmenetelmä, jonka periaate yksinkertaistettuna on:

- Paalut vastustavat liukupintasortumaa pienimmällä seuraavista vaikutuksista: paalun läpileikkautuminen liukupinnan yläpuolisella osalla, paalun alapään kantokyvyn pettäminen, paalun poikkileikkautuminen.
- Lisäksi paalut voivat kantaa paalujen päiden yläpuolisen kuorman, jos ne on varustettu laattarakenteella taikka harkinnanvaraisen osan yläpuolisesta kuormasta, jos paalut on varustettu paaluhatuilla.

Luiskapaalutus soveltuu käytettäväksi siltti- ja savimaassa, kun pehmeiden kerrosten syvyys on liian suuri luiskaan tehtävää massanvaihtoa ajatellen. Liian pehmeisiin saviin menetelmä ei sovellu, koska ne voivat sortua valumalla paalujen välistä. Luiskapaalutuksissa käytetään myös puupaaluja. Paalujen lyönti aiheuttaa maakerrosten häiriintymistä, eikä luiskan kaivutyötä pidä aloittaa ennen lujuuden riittävää palautumista.



Kuva 17. Luiskapaalutus.

#### 3.4.8 Tukimuurit ja kaukalot

Tukimuurirakenteiden (esimerkiksi teräsbetonisten kulmatukimuurien, lujitemaamuurien taikka kivi- tai betonimuurien) käyttöön on yleensä olennaisempaa syynä tilanpuute kuin luiskan vakavuuden parantaminen. Monissa tapauksissa, varsinkin savi- ja pehmeiköillä, tukimuurirakenteiden työnaikaiset kaivannot vaativat huomattavia tuentatoimenpiteitä.

Teräsbetonikaukaloiden käyttöön on yleensä ratkaisevimpana syynä pohjaveden alenemisen estäminen. Myös tilanpuute sekä luiskien vakavuuskysymykset vaikuttavat usein kaukalaratkaisun valintaan. Kaukaloiden mitoitus joudutaan tarkistamaan myös nosteen kannalta.

### 3.4.9 Luiskanvahvistusmenetelmien yhdistelmät

Seuraavassa käsitellään erilaisten vahvistusmenetelmien tunnettuja yhdistelmiä. Yleensä luiskanvahvistusmenetelmät ovat hyvin yhdistettävissä ja muitakin yhdistelmiä voidaan keksiä.

Kevennysleikkaus voidaan yhdistää kaikkiin muihin vahvistusmenetelmiin ja yhdistelmä on yleensä teknistaloudellisesti edullinen, jos sille on tilaa.

Luiskaverhouksen tarve vähenee muiden menetelmien yhteydessä, mutta se voidaan luonnollisesti yhdistää niihin.

Kohdassa 3.3.5 esitetty kaksoisponttiseinäratkaisu on eräänlainen tukiseinän ja massanvaihdon yhdistelmä.

## 3.5 Pohjavedenalennus

Pohjaveden alentaminen pienentää hiukan maan vesipitoisuutta, mikä usein ratkaisevasti pienentää häiriintymisherkkyyttä. Pohjaveden pumppaamisesta aiheutuva imupaine lisää tilapäisesti maan lujutta ja parantaa luiskien vakavuutta sekä estää leikkauspohjan hydraulisen murtuman vaaraa.

Yleisin varsinainen pohjavedenalennusmenetelmä on tyhjiöpumppaus (ns. wellpoint-menetelmä). Siinä päästään enimmillään noin 5 m alennussyvyyteen ja porrastettuna suurempaan. Menetelmä onnistuu parhaiten hienossa hiekassa, siltissä tai moreenissa. Silttikerrokset ovat usein kerrallisia, joten välissä olevien karkeampien linsien kautta imeminen onnistuu yllättävänkin hyvin. On huomattava, että alennuksen onnistumisen mittapuu ei ole pumpattu vesimäärä, vaan pohjavedenpaineen aleneminen. Lohkareisessa moreenissa imukärjet joudutaan asentamaan poraamalla, mikä likimain kaksinkertaistaa kustannukset.

Muita toimenpiteitä, joilla pohjavettä voidaan alentaa ja kaivutöitä helpottaa, ovat:

- työjärjestyksen suunnitteleminen sellaiseksi, että työn alkuvaiheessa tehtävät kaivut ja kuivatusjärjestelyt ehtivät alentaa pohjavettä
- leikkauspohjaan tehtävistä kaivoista pumppaaminen, mikä vaikuttaa parhaiten karkeissa moreeneissa taikka hiekoissa.

Pohjaveden alentamista varten on selvitettävä tarkasti maakerrokset ja niiden vaihtelu sekä pohjavedenpinta vaihteluineen ja mahdollinen orsivesi.

Pohjaveden alentamisen onnistumisen kannalta riskitekijöitä ovat maakerrosten vaihtelevuus ja työvirheet. Toisaalta pohjaveden alentamisen onnistumisen täsmällinen määrittäminen on vaikeaa. Epätäydellisestikin onnistunut pohjavedenalennus voi ratkaisevasti helpottaa kaivutyötä.

## 4 Ratkaisun valinta elinkaarikustannusten perusteella ja huomioonotettavat tekijät

### 4.1 Tekniset vaatimukset

Pohjarakennusratkaisun tulee täyttää seuraavat tekniset perusvaatimukset:

- Vakavuuden tulee olla riittävä sortumavaaran sekä haitallisten siirtymien välttämiseksi. Varmuusvaatimukset on esitetty Eurokoodi 7:ssä, sen kansallisessa liitteessä (LVM-liitteessä) ja soveltamisohjeessa NCCI 7.
- Tien painumat eivät saa olla haitallisen suuret. Sallitut painumat on esitetty joko hankekohtaisissa tuotevaatimuksissa tai Liikenneviraston ohjeessa 10/2012 Tien geotekninen suunnittelu. Myöskään ympäristöön ei saa aiheutua haitallisia painumia.
- Ratkaisun tulee sopia yhteen muiden rakenteiden, esimerkiksi siltojen kanssa.

Maanvaraisen penkereen käyttöikä on Liikenneviraston ohjeen 10/2012 Tien geotekninen suunnittelu mukaan 100 vuotta. Tieleikkauksen käyttöikä on 100 vuotta. Massanvaihdon, syvästabiloinnin, suihkuinjektoinnin ja pystyjoituksen suunnittelussa huomioitava käyttöikä on 100 vuotta. Kevennysrakenteille suunnittelussa huomioitava käyttöikä on 100 vuotta. Pudotustiivistyksen suunnittelussa huomioitava koko rakenteen käyttöikä on 100 vuotta. Paalulaatta- ja paaluhatturakenteiden suunnittelussa huomioitava koko rakenteen käyttöikä on 100 vuotta. Siirtymärakenteiden suunnittelussa huomioitava koko rakenteen käyttöikä on 100 vuotta. Tukimuuri- ja kaukalorakenteiden käyttöikä on 100 vuotta. Melusteiden ja meluvallien suunnittelussa huomioitava käyttöikä on 50 vuotta.

### 4.2 Laatutasotavoitteen valinta

Painumamitoituksen tavoitetasoksi ei läheskään aina valita sallittuja maksimipainumia, vaan tapauskohtaisesti harkiten vertaillaan erilaisia perustamistapavaihtoehtoja ja niillä saavutettavaa laatutasoa elinkaarikustannusten kannalta. Sopimusmuodosta riippuen tämä tarkastelu voidaan tehdä joko tilaajajohtoisessa suunnittelussa tai esimerkiksi elinkaariurakassa, jossa myös urakoitsija hyötyy sallitun minimitaso ylittävästä laadusta.

Laatutasoltaan erilaisia ratkaisuja vertailtaessa on huomattava, että hyvin perustettu tie on jatkuvasti hyvässä kunnossa, kun taas huonommin perustettu ja usein korjattava tie on vain hetkellisesti yhtä hyvässä kunnossa.

### 4.3 Rakentamiskustannukset

Rakentamiskustannukset ovat perinteisesti parhaiten hallittu perustamistavan valintaperuste, mikä ei saa kuitenkaan johtaa sen ylikorostamiseen. Kustannukset laskeaan tapaukseen sopivalla tarkkuudella mitoitettujen ratkaisujen pohjalta.

Vertailuja varten lasketaan pohjarakentamisen kokonaiskustannukset tarkasteltavaa pehmeikköosuutta kohti. Vertailussa otetaan huomioon eri vaihtoehtojen mahdollisesti erilaiset päällysrakennusratkaisut taikka muut kustannusvaikutukset. Verrattuna tyyppipoikkileikkaustarkasteluun ja prosentuaalisiin kustannuseroihin saadaan seuraavat hyödyt:

- Saadaan havainnollinen käsitys suoritettavan kustannustarkastelun absoluuttisesta rahallisesta merkityksestä sekä merkityksestä suhteessa hankkeen kokoon.
- Saadaan käsitys siitä, voiko mahdollinen suurikin prosentuaalinen säästö pienessä asiassa kumoutua jollain muulla näkökohdalla, kuten esimerkiksi rakennusajan pitenemisellä taikka rakennuttajan työmäärän kasvulla.
- Saadaan käsitys vaihtoehtojen ratkaisujen seurannaisvaikutuksista, esimerkiksi erilaisten siirtymärakenteiden vaikutuksista kustannuksiin.

Kustannusarvion laadintaohjeita ja yksikköhintoja on esitetty esimerkiksi julkaisussa Pohjarakentamisen kustannustietoja TIEH 4000330. Yksikkökustannusten muodostumiseen vaikuttavat myös urakoitsijakohtaiset tekijät. Kustannusarvion laadinnassa on erityisesti hankkeen olennaisten kustannusten osalta hyödynnettävä toteutumatietoja vastaavan kaltaisista saman seudun kohteista yhteistyössä urakoitsijoiden kanssa.

Kustannusarvion luotettavuus ja sen mahdolliset vaihtelurajat arvioidaan. Tähän liittyviä näkökohtia ovat muun muassa:

- Hankkeen massatalouden vaikutus. Esimerkiksi massanvaihdon hinta riippuu ratkaisevasti siitä, saadaanko täyttömassat tielinjalta vai joudutaanko ne hankkimaan muualta ja minkälaiset ovat läjitysmahdollisuudet.
- Jos menetelmä on vain harvojen urakoitsijoiden käytössä, sen hinta on suhdanneherkempi kuin yleisempien menetelmien.

Kohdissa 4.1–4.2 on käsitelty alustavissa suunnitteluvaiheissa tehtävän kustannusten arvioinnin erityispiirteitä.

## 4.4 Ylläpitokustannukset

Laatutasoltaan erilaiset ratkaisut johtavat erilaiseen ylläpitotarpeeseen ja erilaisiin ylläpitokustannuksiin, jotka on pohjarakennusratkaisuja tehtäessä aina otettava huomioon.

Ylläpitotarve arvioidaan ensin laskennallisten painumien pohjalta. Tämän lisäksi arvioidaan yllättävien painumien riski. Tiehen tulevat epäjatkuvuuskohdat (sillat, putki-johdot) otetaan huomioon ylläpitotarvetta lisäävänä tekijänä.

Ylläpitotarvetta ei pidä arvioida pelkkinä päällystysteknisinä toimenpiteinä, jos pohjarakennusratkaisu on sellainen, että painumien tasoittaminen päällysteellä on tehontonta. Tällöin varaudutaan johonkin laajempaan korjaustoimenpiteeseen.

## 4.5 Ympäristövaikutukset ja ympäristökuormitukset

Seuraavassa käytetään termiä:

- ympäristövaikutus sellaisista vaikutuksista, joiden välttäminen tai lieventäminen on suunnittelussa pakollinen reunaehto ja joista aiheutuvat kustannukset suoraan vaikuttavat hankkeen talouteen
- ympäristökuormitus sellaisista vaikutuksista, joista aiheutuvat mahdolliset kustannukset eivät ainakaan nykytilanteessa suoraan vaikuta hankkeen talouteen.

Usein toistuvia perustamistavan valinnassa huomioonotettavia ympäristövaikutuksia ovat:

- pehmeiden massojen sivusiirtymät (pohjaantäytössä)
- kaivantoluiskan sortuman vaara (erityisesti massanvaihdossa kaivamalla, mutta joskus muissakin ratkaisuisissa)
- kaivumassojen kuljetuksesta ja läjityksestä aiheutuvat maisemahaitat, liikenneväylien likaantuminen ja lisääntyneen liikenteen haitat (massanvaihdossa)
- melu ja tärinä (erityisesti paalutuksessa, mutta myös muissa menetelmissä)
- pohjaveden aleneminen (kaivutöiden vaikutuksesta)

Edellä on esitetty ympäristövaikutuksia, jotka usein vaikuttavat ratkaisun valintaan. Näiden lisäksi otetaan huomioon sellaisia ympäristövaikutuksia, jotka tarkalla suunnittelulla ja toteutuksella joudutaan vain minimoimaan, koska menetelmää ei pystytä vaihtamaan ympäristövaikutuksiltaan lievempään. Tällaisia ovat esimerkiksi paalutukseen liittyvät tärinä, häiriintyminen, tai huokosvedenpaineen nousu taikka syvästabilointiin liittyvä työnaikainen pohjamaan häiriintyminen.

Useimmat esitetyistä ympäristövaikutuksista ovat joko kokonaan työnaikaisia tai työn aikana voimakkaimmillaan esiintyviä. Pysyviä voivat olla lähinnä vaikutukset pohjaveteen.

Erialaisten pohja- ja päällysrakenneratkaisujen ympäristökuormitusten arviointiin on kehitetty alustavia työkaluja. Luettelot huomioonotettavista tekijöistä voidaan likimain lyhentää seuraavan kaltaiseksi:

- energiankulutus (melko hyvin määritettävissä)
- luonnon maamateriaalien käyttö (määrä melko hyvin määritettävissä, mutta materiaalien paikallinen saatavuus ja ottoalueen herkkyys ympäristöhaitoille voivat olla varsin vaihtelevia)
- päästöt (esimerkiksi hiilidioksidin osalta melko hyvin määritettävissä).
- melu ja pöly (kohtalaisen hyvin määritettävissä)
- liukoisuudet maaperään (vaikeammin määritettävissä, samoin vaikutusten todellinen haitallisuus).

Eri vaikutukset pitää arvottaa niin, että ne tulevat yhteismitallisiksi. Menetelmien ollessa kehittelyn alaisia voidaan tarkastelua yksinkertaistaa esimerkiksi:

- jättämällä tarkastelun ulkopuolelle tekijät, joiden välillä ei eri vaihtoehdoissa ole eroja
- harkitsemalla vaikeasti määritettävien tekijöiden huomioonottamisen välttämättömyys
- tinkimällä arvotuksen tarkkuudesta, jos vaihtoehtojen väliset erot eri tekijöiden osalta ovat samansuuntaiset, kuten usein tapahtuu.

Ympäristökuormituksista voidaan arvotusmenettelyä käyttäen muodostaa ympäristökuormitusindeksi. Eri vaihtoehtojen erilaisten kustannusten ja erilaisten ympäristökuormitusindeksien yhteismitalliseen vertailuun ei ole toistaiseksi suosituksia ja kyseisten tekijöiden keskinäinen painotus on joka tapauksessa tarpeen ratkaista hankekohtaisesti.

## 4.6 Pohjarakenteiden pitkäaikaiskestävyys

Pohjarakenteiden vanhenemisominaisuuksia voidaan tarkastella seuraavasti:

- Painumattomien pohjarakenteiden kestävyys riippuu rakenteessa käytettävien materiaalien (massanvaihtotäyttö, betoni, teräs, puu) kestävydestä edellyttäen, että alueellinen vakavuus on kunnossa.
- Painuvissa pohjarakenteissa (kevennetty pengeri, osittainen massanvaihto, pysty-ojitus, syvästabilointi määrämittaisilla pilareilla) rakenteen kokonaiskestävyys riippuu materiaalien kestävyden lisäksi myös rakenteen kanssa kosketuksissa olevan maapohjan herkkyydestä mitoitusvirheille ja olosuhteiden muutoksille (esimerkiksi pohjaveden alenemiselle).
- Esimerkiksi saven alarajaan ulotetun syvästabiloinnin käyttäytyminen on näiden ääritapausten väliltä.

Pohjarakenteiden vaurioiden ennakoitavuudesta voidaan todeta:

- Painumattomaksi mitoitettun rakenteen (erityisesti paalulaatta- tai paaluhatturakenteen) painumat ovat todennäköisesti hyvin hälyttävä merkki ja ko. rakenteen vaurioituttua sortuman vaara kasvaa äkillisesti.
- Painuvissa rakenteissa varmuus sortumaa vastaan riippuu alusta alkaen myös maaperästä. Sortumavaaran jostain syystä kasvaessa ilmenee usein (ei aina) painumia, joiden syyn arviointi auttaa selvittämään, onko sortumavaara kasvanut.

Eri pohjarakennusratkaisuista voidaan todeta:

- Paalulaattarakenteen käyttöikä voitaneen arvioida teräsbetonirakenteiden normaalien periaatteiden mukaisesti ottaen huomioon ko. rakenteiden kosteusolosuhteet ja betonin kestävyys maaperässä. Paalulaattarakenteen ja maapohjan yhteistoiminta on vähäistä ja paalulaattoja käytetään usein sellaisissa pohjasuhteissa, että paalujen tai laatan rikkoutuminen voi aiheuttaa sortuman. Maapohjan heikko alueellinen vakavuus voi vaurioittaa paalulaattarakenteita, mutta painumia tms. lievempiä maapohjan liikkeitä paalulaattarakenteet kestävät melko hyvin.



- Paaluhatturakenne on paalulaattarakenteeseen verrattuna toiminnallisesti epämääräisempi ja siihen sisältyy riskejä (paaluhattujen liikkuminen ja kallistuminen). Muuten paaluhatturakenteen toimintaperiaatteet ovat samankaltaiset kuin paalulaattarakenteen.
- Syvästabilointipilarien mahdollisesta heikkenemisestä ajan myötä ei ole tietoa suuntaan eikä toiseen. Jos pilarien lujuus merkittävästi heikkenisi, se saattaisi aiheuttaa kuormituksen vähenemistä pilareilla ja lisääntymistä savella sekä tämän seurauksena pientä nopeaa käyttövaiheen painumaa ja tämän jälkeen uuden tasapainotilanteen. Ainakaan tavallisissa tapauksissa ei voine syntyä vakavuuden kannalta vaarallisia tilanteita. Tarkkoja tietoja ei ole myöskään päinvastaista muutosta aiheuttavasta pilarien lujuudenlisäyksestä 3 kk iän jälkeen. Pilarien yläpäiden jäätyminen voi joissain tapauksissa olla pitkäaikaiskestävyyttä heikentävä tekijä, mutta harvoin merkittävä.
- Onnistuneen massanvaihdon voidaan arvioida olevan muuttumaton rakenne.
- Pystyojituksessa painumia ja erityisesti painumanopeutta harkitusti kasvatetaan ja konsolidaatiopainuman saaminen luotettavasti pysähtymään on monissa tapauksissa osoittautunut ongelmalliseksi. Kun konsolidaatiopainumia nopeutetaan, myös tavallisissa tapauksissa erittäin hitaat ja usein haitattomat sekundääripainumat alkavat vaikuttaa aikaisemmin.
- Teräsrakenteiden korroosio on ennustettavissa oleva pohjarakenteen vanhenemisilmiö.
- Koska synteettiset lujitteet viruvat, niiden pitkäaikaislujuus huononee. Tähänastinen tieto perustuu lähinnä ekstrapolaatioon. Lujitteen pitkäaikaistarve monissa tapauksissa vähenee konsolidaation edetessä (maanvaraiset rakenteet), mutta paaluhatturakenteeseen taikka syvästabilointiin yhdistetyn lujitteen osalta ei.
- Kevytsoran ominaisuuksien kestävydestä on jonkin verran tietoa. Ainakin 20–30 vuotta vanhoista kevytsorakevennyksistä kaivettu materiaali on ollut täysin uudelleenkäyttökelpoista. Kevytsoran mahdollisessa vanhenemisessä kriittisin tekijä lienee vaara kevytsorarakenteiden murenemisestä dynaamisten kuormitusten alaisena, mikä rajoittunee aivan kevennyksen pintaosiin. Puutteellisesti kuivateuissa kevennyksissä vettyminen voi kasvattaa tilavuuspainoa ja heikentää kevennyksen tehokkuutta.
- Yleensä kevennysmateriaaleissa voi esiintyä murenemistä, tiivistymistä, vetymistä tai kemikaalien aiheuttamaa syöpymistä vaihtelevassa määrin ko. materiaalin ominaisuuksista riippuen.
- Kevennysrakenteen kokonaiskestävyys voi varsin pientenkin mitoitus- tai toteutusvirheiden taikka pohjaveden alenemisen johdosta olla huonompi kuin itse kevennysmateriaalin ja rakenne voi olla hankalastikin korjattava. Tämä on tilanne erityisesti, jos kevennyksellä pyritään täysin painumattomaan rakenteeseen ja tavoitteessa ei onnistuta. Sen sijaan silttipohjalla esikuormituksen ja kevennyksen yhdistelmärakenteiden mitoituksen onnistuneisuus voidaan usein todeta työn-aikaisilla tarkkailumittauksilla.

## 4.7 Pohjarakennustyön onnistumisvarmuus

Perustamisratkaisuja vertailtaessa tulee ottaa huomioon ratkaisun onnistumisvarmuus. Ratkaisun työnaikaista onnistumista voidaan tarkastella ainakin seuraavilta näkökannoilta:

- vakavuus pysyvässä tilanteessa
- vakavuus työnaikaisissa tilanteissa
- ympäristövaikutusten pysyminen sallituissa rajoissa
- työn onnistuminen niin, ettei työvirheillä ole aiheutettu jatkossa tapahtuvia lisäpainumia
- työn aikana ilmenevien lisäkustannusten ja työn viivästymisen riski.

Pysyvän tilanteen vakavuuden tulee olla Eurokoodi 7:ssä, sen kansallisessa liitteessä (LVM-liitteessä) ja soveltamisohjeessa NCCI 7 esitetyt vaatimukset täyttävä. Minimivaatimukset ylittävä vakavuus voidaan ottaa jonkin ratkaisun ylimääräisenä etuna huomioon. Työnaikaisten tilanteiden vakavuuksissa (esimerkiksi massanvaihtokaivannon vakavuus vapaassa maastossa tai pohjaantäytöt) voidaan hyväksyä tavanomaista huonompi varmuustaso, jos mahdolliset haitat rajoittuvat vähäisiksi ja ratkaisulla on saavutettavissa merkittäviä säästöjä.

Erittäin oleellinen tarkasteltava asia on ratkaisun herkkyys lähtötietojen virheille, pienille työvirheille tai suunnitelman epätarkalle noudattamiselle. Riskitekijöitä on kohdissa 2.1 ja 2.3 käsitelty menetelmäkohtaisesti.

Tarkkailumittauksilla voidaan perustamismenetelmästä ja tapauksesta riippuen ohjata työtä ja varmistaa lopputulos, tarkkailla vaikutuksia ympäristöön tai tarkentaa mitoitusta ja saavuttaa vielä rakentamisaikavaiheessa säästöä.

## 4.8 Muut tekijät

### 4.8.1 Tilantarve

Varsinkin taajama-alueilla tilantarve on merkittävä pohjanvahvistusmenetelmän valintaan vaikuttava tekijä. Tilaa vaativia menetelmiä ovat lähinnä vastapenkereet ja kevennysleikkaukset sekä pystyjoitus, koska se useimmiten edellyttää vastapenkereitä. Esimerkiksi viereen tulevat muut liikenneväylät, kunnallistekniikka, kuivatusrakenteet, asemakaavojen rajat tai muu tilanahtaus estävät usein näiden menetelmien käytön.

### 4.8.2 Tarvittava rakentamisaika

Rakentamisaikaa tarvitaan eniten käytettäessä pystyjoitusta, ylipengertä tai vaihteittain pengertämistä, koska tällöin painumien halutaan tapahtuvan rakentamisen aikana. Myös pelkkää painuma-ajan varaamista ilman muita erikoistoimenpiteitä käytetään perustamisratkaisuna. Jos syvästabilointi mitoitetaan myötäväksi, tarvitaan muutamien kuukausien painuma-aika. Lisäksi pohjaantäytössä on yleensä tarpeen ilman laskennallisia perusteita varata itse työn ja tien päällystämisen välille aikaa jäl-

kipainumien välttämiseksi. Muissa menetelmissä tällaisia aikoja ei yleensä tarvita. Joissain tapauksissa on tarpeen valita erityisen nopeasti toteutettava ratkaisu.

#### 4.8.3 Työnaikainen liikenne

Työnaikaisella liikenteellä voi olla seuraavia vaikutuksia pohjarakennusmenetelmän valintaan:

- Liikenteelle aiheutuva haitta voi pakottaa lyhyeen rakentamisaikaan.
- Nykyiset liikenneväylät tai rakennettavat kiertotiet voivat rajoittaa käytettävissä olevaa tilaa ja aiheuttaa tuentatarvetta.
- Nykyisten liikenneväylien vaurioitumista on varottava.
- Uudet liikenneväylät voidaan joutua rakentamaan vaiheittain.
- Rakennettavat kiertotiet voivat vaatia perustamistoimenpiteitä.

#### 4.8.4 Tulevat rakentamsvaiheet

Tierakenteiden perustamistapoja suunniteltaessa tarkastellaan aina jollain tarkkuudella ratkaisun sopivuus mahdollisiin tuleviin rakennusvaiheisiin. Usein on mahdollista pienin lisäkustannuksin helpottaa tien myöhempää leventämistä, esimerkiksi pienellä levennyksellä perustamistoimenpiteeseen (esim. paalulaattarakenteeseen, syvästabilointiin tai massanvaihtoon) taikka vinopaalujen välttämällä paalulaattarakenteessa. Pohjanvahvistusten tekeminen kokonaan valmiiksi tulevia rakennusvaiheita varten on harvoin taloudellisesti perusteltua. Lähinnä saattaa tulla kysymykseen pohjaantäytön leveyden valitseminen tulevia tarpeita silmälläpitäen, koska pohjaantäyttöjen leventämiseen usein liittyy teknisiä hankaluuksia ja ratkaisu saattaa massatilanteesta riippuen olla edullinen.

Eri aikoina rakennettavien tien osien perustamistavan tulisi yleensä olla sama. Joissain tapauksissa voidaan eri aikoina rakennettavien ajoratojen linjauksella vähentää perustamistapojen riippuvuutta toisistaan. Saman ajoradan alueella perustamistavan vaihtaminen poikkisuunnassa on perusteltua vain poikkeustapauksissa ja ratkaisu on suunniteltava erittäin tarkasti nimenomaan poikkisuuntaisten painumaerojen minimoinnin näkökulmasta.

Hankkeen luonteesta riippuen voidaan arvioida myös ratkaisujen muuntojoustoa, toisin sanoen pohjarakennetun maapohjan käytettävyyttä tulevaisuudessa:

- liikenneväylän muuttuvalle tasaukselle
- liikenneväylien muuttuville linjauksille
- talonrakennukseen tms. muuhun käyttöön.

Muuntojoustoltaan hyvä ratkaisu on mm. massanvaihto riittävän kantaviin kerroksiin ulotettuna. Tavanomainen syvästabilointi ja paalulaattarakenne ovat usein uudelleenkäytettävissä varsinkin pengerkevennystä käyttäen. Määrämittainen syvästabilointi on hankalampi. Erityisen huono muuntojoustoltaan on pystyöjitus ja pystyöjitusta käyttäen perustetut tienosat voivat aiheuttaa suuria hankaluuksia varsinkin tasauksen nostolle sekä myös linjauksen muutoksille ja penkereiden leventämisille. Esimerkiksi, kun liittymämuutoksia voidaan odottaa tapahtuviksi, tämä on yksi lisäsyy suhtautua kriittisesti pystyöjituksen käyttömahdollisuuksiin. Pengerkevennys on yleensä hyödynnettävissä ainakin poiskaivettuna ja uudelleenkäytettynä.

#### 4.8.5 Tien käyttäjän kustannukset

Varsinkin pääteillä voidaan tien käyttäjän kustannusten olettaa pysyvän jokseenkin vakioina erilaisia pohjarakennusratkaisuja verrattaessa. Korkealuokkaisilla teillä ei epätasaisuuksien ja muiden vaurioiden voida sallia kehittyvän niin haitallisiksi, että ne merkittävästi kasvattaisivat tien käyttäjien aika- ja ajoneuvokustannuksia.

Erilaatuisille pohjarakennusratkaisuille ei tarvitse arvioida onnettomuuskustannuksia, sillä niiden riippuvuus perustamistavasta on erittäin epävarmaa.

Konkreettinen tien käyttäjän kustannuksiin vaikuttava tekijä ovat kunnossapitotoimenpiteet, jotka voivat aiheuttaa:

- aikakustannusten lisääntymistä työmaiden nopeusrajoitusten ja mahdollisten kiertoteiden vaikutuksesta
- ajoneuvokustannusten lisääntymistä kiertoteiden vaikutuksesta.

Tietyömaiden aiheuttamia tien käyttäjien lisäkustannuksia on käsitelty selvityksessä Tietyömaiden liikennehaittojen arviointi, Tielaitoksen selvityksiä 14/2000.

## 4.9 Vaihtoehtojen karsiminen ja valikointi

### 4.9.1 Pohjasuhteet, tiegeometria ja pakkopisteet

Useissa tapauksissa voidaan perustamistavavaihtoehtoista nopeasti valikoida kysymykseen tulevat vaihtoehdot, joiden välillä tehdään tarkempia vertailuja. Vaihtoehtojen ensimmäiseen valikointiin vaikuttavia tekijöitä ovat pohjasuhteet ja tiegeometria sekä pakkopisteet, kuten esimerkiksi penkereeseen rajoittuvat sillat ja niiden perustamistapa. Tarkastelussa on aina otettava huomioon mahdollisuus muuttaa tilannetta tiegeometrian muutoksella, varsinkin alustavissa suunnitteluvaiheissa.

#### Penger savipehmeiköllä

Jos pengerkorkeus on niin suuri, että tiepenkereen vakavuus ilman perustamistoimenpiteitä ei ole lähelläkään riittävää, kysymykseen tulevat lähinnä paalulaattarakenne tai massanvaihto. Silloin, kun pehmeikkö on matala, massanvaihto kaivamalla on useimmiten taloudellisesti paalulaattarakennetta edullisempi. Suuremmilla pehmeikkösyvyyksillä vertaillaan usein paalulaattarakennetta ja pohjaantäyttöä. Näiden välinen teknistaloudellinen edullisuusero on tapauskohtainen, mutta yleisesti voidaan todeta paalulaattarakenteen kustannusten suurempi riippuvuus pengerkorkeudesta kuin pehmeikkösyvyydestä, kun taas pohjaantäytön osalta tilanne on päinvastainen. Suurilla pengerkorkeuksilla eivät siis painumatarkastelut ole tarpeen perustamistavan valinnassa.

Kun kokonaisvarmuus penkereen sortumaa vastaan on vähintään ykkösen luokkaa, myös syvästabilointi alkaa tulla kysymykseen perustamistapana. Tapauksesta riippuen lähtötilanteen vakavuudelle asetetaan hiukan toisistaan poikkeavia vaatimuksia ja tilannetta voidaan säädellä esimerkiksi vastapenkereillä. Lähtötilanteen riittävä vakavuus ei varsinaisesti ole syvästabiloinnille välttämätön tekninen edellytys, vaan varovaisuuden sanelema vakiintunut suunnitteluperuste. Useimmilla syvästabilointiratkaisuille voidaan päästä käyttövaiheessa jokseenkin varmasti painumattomaan tiepenkereeseen. Tapauksesta riippuen syvästabilointia voidaan joutua vertailemaan

joko vielä varmemmin painumattomiin paalulaattarakenteeseen ja massanvaihtoon taikka painumastandardiltaan epävarmempiin pystyjoitukseen tai pengerkevennykseen.

Kun varmuus penkereen sortumaa vastaan on vähintään jonkin verran yli ykkösen ja vastapenkereille on tilaa, alkaa kysymykseen tulla myös pystyjoitus, kun pyritään hyvään painumastandardiin, taikka pelkät vastapenkereet alempiluokkaisilla teillä, kun tapahtuvat painumat voidaan sallia.

Kun varmuus penkereen sortumaa vastaan on lähellä riittävää, alkaa kysymykseen tulla myös pengerkevennys. Pengerkevennyksellä saavutettava painumastandardi on hyvin tapauskohtainen.

Pienehkö vakavuuden parannus voidaan aikaansaada myös lujitteilla.

Vakavuuden ollessa riittävä tulee hyvin matalilla savipehmeiköillä kysymykseen myös esikuormitus.

Savipehmeiköllä paaluilla perustettavaan siltaan rajoittuva penger useimmiten perustetaan paalulaattarakennetta käyttäen.

### **Penger silttipehmeiköllä**

Silttipehmeiköiden erikoispiirteenä on painumien nopeus ja vakavuuden huomattava paraneminen jo rakennusaikaisen esikuormituksen vaikutuksesta. Näistä syistä edellä mainitut nyrkkisäännöt eivät ole samalla lailla voimassa. Silttipehmeiköillä otetaan perustamistoimenpiteiden valinnassa ja mitoituksessa huomioon mahdollisuus taloudellisimpiin ratkaisuihin esikuormituksen, tarkkailumittausten ja yhdistelmä-rakenteiden avulla.

Silttipehmeiköillä käytetään paalulaatta- tai paaluhatturakennetta varsin harvoin muuten kuin paaluilla perustettavien siltojen tulopenkereissä. Silttipehmeiköillä myös muut tulopenkereen perustamistavat saattavat tulla kysymykseen paaluilla perustettavan sillan yhteydessä.

### **Leikkausluiska**

Leikkausluiskan todennäköinen vahvistamismenetelmä ratkeaa useimmiten seuraavalla tarkastelulla:

- Onko vakavuus riittävä mahdollisella eroosion kannalta välttämättömällä verhouksella?
- Jos ei, onko mahdollista tehdä kevennysleikkaus (yleensä kustannuksiltaan varsin edullinen)?
- Jos ei, onko pehmeikkösyvyys sellainen, että massanvaihto luiskassa on mahdollinen?
- Jos ei, joudutaan tarkastelemaan ponttiseiniä tms. erikoisratkaisuja.

#### 4.9.2 Painumastandardi

Painumastandardin vaikutus vaihtoehtojen alustavan karsinnan vaiheessa tapahtuu mm. seuraavilla tavoilla:

- Lyhyillä pehmeiköillä tai siltojen läheisyydessä on valittava jokseenkin painumattomia ratkaisuja.
- Esimerkiksi pengerkevennys voi pudota pois, kun penger on matala, kuivakuori-kerros niin ohut, ettei riittävän paksua kevennystä voida mielekkäästi toteuttaa ja painumat jäävät väkisinkin liian suuriksi.

Usein painumien perusteella tapahtuva ratkaisujen valinta tapahtuu tarkempien tarkastelujen perusteella, ks. kohta 3.2.

#### 4.9.3 Kirjavuuden vähentäminen

Perustamistapojen suunnittelussa pitää toisaalta pyrkiä kustannuksiltaan taloudellisiin ratkaisuihin ja toisaalta suunnitelman pohjarakennusratkaisuista ei pidä tehdä tarpeettoman tiheästi vaihtelevia.

Ratkaisujen sopivan vaihtamistiheyden valintaan liittyvistä näkökohdista ehdottomasti olennaisin on muutoskohtien välisten siirtymärakenteiden epäonnistumisen riski. Jos kysymyksessä ovat esimerkiksi herkästi epäonnistuvat pystyojituksen ja painumattomampien perustamistapojen rajakohtat, niiden määrän minimointi on tärkeämpää kuin yleensä moitteettomasti onnistuvien massanvaihdon ja paalutuksen rajakohtien minimointi.

Vaikeampi on määrittää, paljonko pitkät yhtenäiset perustamistapajaksot vaikuttavat alentavasti rakentamisen yksikkökustannuksiin silloin, kun kaikkia käytettäviä ratkaisuja joka tapauksessa esiintyy hankkeessa. Asiaa kannattaa pohtia urakoitsijan kanssa. ”Hankkeen ainoan” erikoistyön taloudellisuutta kannattaa vakavammin pohtia, mutta esimerkiksi syvästabiloinnissa ei kohteen pienuus sinänsä kovin olennaisesti nosta yksikköhintaa.

Perustamisratkaisujen kustannuksia ja niiden eroja tarkastellaan suhteessa hankkeen kokonaiskustannuksiin ja yleiseen luonteeseen.

Perustamistapojen muutoskohtia pohdittaessa otetaan luonnollisesti huomioon, perustuvatko ne olennaisiin pohjasuhteiden muutoksiin vai hyvin pieniin lähes tulkinanvaraisiin eroihin.

## 4.10 Ratkaisun valinta elinkaari- kustannusten perusteella

Aluksi on tarkistettu (vrt. kohta 3.8.1), mitkä ratkaisuvaihtoehdot täyttävät tekniset perusvaatimukset. Ympäristövaikutusten perusteella jotkin vaihtoehdoista ovat voineet karsiutua pois. Jäljellejääneitä vaihtoehtoja verrataan:

- laatutasoltaan (ks. kohta 3.8.2)
- rahallisilta kustannuksiltaan (rakennuskustannukset, ylläpitokustannukset, tien käyttäjän kustannukset)
- ympäristökuormituksiltaan (ks. kohta 3.4), jotka tarkastelumenetelmien kehittyessä opittaneen yhä paremmin muuttamaan kustannusten kanssa vertailukelpoiseen muotoon.

Elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa on perusteltua jättää tarkastelun ulkopuolelle sellaiset kustannukset, joissa ei ole eroja vaihtoehtojen välillä.

Rakennuskustannukset kerrotaan tarvittaessa hankekohtaisesti harkiten työnaikaista riskiä kuvaavalla kertoimella ( $>1,00$ ).

Kunnossapitokustannukset ja kunnossapitotoimenpiteistä aiheutuvat tienkäyttäjän kustannukset kerrotaan tapauskohtaisesti harkitulla pohjarakennusmenetelmäkohtaisella kertoimella ja diskontataan nykyhetkeen.

Elinkaarikustannuksiltaan edullisin ratkaisu valitaan toteutettavaksi.

Liitteen 1 taulukossa on esitetty menetelmäkohtaisesti elinkaariedullisuuteen liittyviä tekijöitä.

Liitteessä 2 on kuvattu erään suopehmeikkörampin pohjarakennusmenetelmien valinnan kulku. Tapaus on 1980-luvulta, joten siinä ei tule ilmi elinkaarikustannusten käyttö. Esimerkki kuvaa joka tapauksessa todellista tapausta dokumentoituine erikoispiirteineen ja valittuihin perustamisratkaisuihin todennäköisesti päädyttäisiin myös elinkaarikustannusten pohjalta.

## 5 Pohjarakennusratkaisun valinta eri vaiheissa

### 5.1 Esisuunnitteluvaiheet

Hankkeen kustannukset määräytyvät varsin pitkälle esisuunnitteluvaiheissa tehtävien ratkaisujen pohjalta ja näissä vaiheissa geosuunnittelun tärkein tavoite on arvioida oikein erilaisten tie- ja siltateknisten ratkaisuvaihtoehtojen pohjarakennuskustannukset. Pohjarakennusratkaisun valinta tehdään lähinnä kustannusten arviointia varten. Sopivien menetelmien valinnassa, niiden mitoituksessa ja kustannusten arvioinnissa käytetään varovaisuutta seuraavista syistä:

- Maaperätutkimusten määrä on alustavissa vaiheissa pieni ja pohjasuhteiden arviointi sisältää riskiä.
- Karkealla tarkkuudella tehtävässä suunnittelussa ei yleensä pystytä ennakoimaan kaikkia työjärjestykseen, ympäristövaikutuksiin ja tiehen liittyviin muihin rakenteisiin liittyviä tekijöitä, jotka voivat rajoittaa pohjarakennusmenetelmän valintaa tai muuten nostaa pohjarakennuskustannuksia.
- Käytettävissä olevan rakentamisajan pituutta ei yleensä vielä tiedetä.

Yleensä esisuunnitteluvaiheissa pohjarakennuskustannukset arvioidaan ns. varmojen ratkaisujen pohjalta. Näitä ovat tiepenkereillä esimerkiksi:

- Paalulaattarakenteet.
- Massanvaihto kaivamalla, kun riittävin pohjatutkimuksin tiedetään, että pehmeikösyvyys pysyy sopivana eivätkä lähistöllä sijaitsevat varottavat rakenteet tee kaivantoa erityisen hankalaksi.
- Pohjaantäyttö vapaassa maastossa, kun massojen läjitysmahdollisuus on varmistettu.
- Varovaisesti mitoitettu syvästabilointi, jos maaperän stabiloituvuus tunnetaan kohdekohtaisten kokeiden perusteella taikka voidaan arvioida hyvän paikallistuntemuksen perusteella, kun kysymyksessä ei ole turve tai lieju.

E erityisen vaativissa kohteissa pohjarakennusratkaisuja ja niiden kustannuksia voidaan tutkia ja varmistaa normaalia tarkemmin.

Esisuunnitteluvaiheissa pohjarakennusmenetelmän valinta perustuu määrällisesti vähäisiin pohjatutkimuksiin. Tällöin on erityisen tärkeää valita tapauskohtaisesti hyödyllisimmät pohjatutkimusmenetelmät. Pohjatutkimusten ja niiden ohjelmoinnin tukena käytetään erityisesti näissä vaiheissa:

- kartta- ja ilmakuvatulkintaa
- geofysikaalisia tutkimuksia
- vanhojen suunnitelmien inventointia
- maastokäynneillä tehtäviä havaintoja.



Esisuunnitteluvaiheissa geoteknisten laskelmien määrä on yleensä vähäinen. Kuitenkin vaikeissa olosuhteissa voidaan tarvita laajojakin laskelmia hankkeen toteutettavuuden, kustannusten sekä väylien linjauksen ja tasauksen valinnan kannalta oleellisten kysymysten ratkaisemiseen. Tällaisia tilanteita voivat olla:

- heikko alueellinen vakavuus
- syvät leikkaukset pehmeikköalueilla
- merkittävät ympäristövaikutukset, kuten pohjaveden aleneminen pehmeikköalueilla pohjarakennustoimenpiteiden johdosta
- rakentamiskustannuksiltaan huomattavat pengerosuudet pehmeiköillä.

## 5.2 Tiesuunnitelmavaihe

Tiesuunnitelmavaiheessa pohjarakennusratkaisun suunnittelu on vietävä niin pitkälle, että voidaan täyttää tielain mukaiset vaatimukset:

- Määrittää tarvittava tiealue.
- Määrittää hankkeen kustannukset.

Nämä vaatimukset edellyttävät sitä, että 1–2 ratkaisua suunnitellaan niin tarkasti, että niiden toteutettavuudesta voidaan olla varmoja ja että kaikki kustannuksiin vaikuttavat oleelliset tekijät sekä tilantarve ja rakentamisaika saadaan selville.

Mahdolliset muut realistiset pohjarakennusratkaisut määritetään mahdollisuuksien mukaan, jotta voidaan varmistaa pohjatutkimusten riittävyys siihen, että urakoitsija pystyy hinnoittelemaan omat vaihtoehdonsa. Hylättyjen vaihtoehtojen hylkäämisen perustelut taikka yleisemminkin eri ratkaisuvaihtoehdoissa todetut käyttökelpoisuutta rajoittavat tekijät on syytä dokumentoida.

Tarvittaessa tiesuunnitelmaa on suositeltavaa täydentää, jotta sen tarkkuus täyttää suunnittelua sisältävän urakkamenettelyn vaatimukset.

Yleisperiaatteena voidaan pitää, että tiesuunnitelmassa tehtäisiin kaikkia hankkeessa tarvittavia pohjatutkimuslajeja ja rakennussuunnitteluvaiheessa vain täydennettäisiin joidenkin tutkimusten määrää.

Aikaa vievät erikoistutkimukset, kuten stabiloituvuustutkimukset laboratoriossa tai maastossa taikka pohjaveden koepumppaukset, tehdään tiesuunnitelmavaiheessa.

Ratkaisujen valintaa varten tarvittavat vakavuus- ja painumalaskelmat pyritään tekemään tiesuunnitelmavaiheessa.

## 5.3 Rakennussuunnitteluvaihe

Rakennussuunnitteluvaiheessa tarkennetaan tiesuunnitelmavaiheen ratkaisuja rakentamisen vaatimusten mukaiseen tarkkuuteen. Pohjarakennusratkaisuja voidaan myös vaihtaa mm. seuraavista syistä:

- Ratkaisuvaihtoehtojen rakennuskustannuksiin vaikuttavat urakoitsijakohtaiset tekijät muuttavat vaihtoehtojen edullisuusjärjestystä.
- Muuten saadaan aikaisemmasta poikkeavaa tietoa ratkaisuvaihtoehtojen kustannuksista (tilaajan teettämässä rakennussuunnitelmassa).
- Pohjatutkimusten tarkentaminen muuttaa ratkaisuvaihtoehtojen edullisuusjärjestystä.
- On ilmennyt tarvetta korjata aikaisemmissa suunnitteluvaiheissa tehtyjä ratkaisuja.

Rakennustoimenpiteiden yksityiskohtaiseen mitoitukseen liittyvät laskelmat, urakoitsijan vaihtoehtojen mitoituskalkelmat sekä hankkeen lopulliseen dokumentointiin liittyvät laskelmat tehdään rakennussuunnitteluvaiheessa.

## 5.4 Sopimusmuotojen vaikutus ratkaisun valintaan

Tien suunnittelun jakaminen esisuunnittelu-, tiesuunnittelu- ja rakennussuunnitteluvaiheisiin on periaatteessa riippumaton siitä, vastaako tilaaja rakennussuunnittelun teettämisestä vai kuuluuko se urakkaan. Suunnittelua sisältävä urakkamenettely (nykyinen nimitys ST-urakka) tuo ratkaisujen valintaprosessiin käytännössä yhden vaiheen lisää, kun käsitellään urakoitsijan tarjousta varten teettämää alustavaa rakennussuunnitelmaa.

ST-urakkatarjousten ollessa käytävissä tiedetään rakennuskustannukset tai ainakin vaihtoehtojen rakennuskustannukset tilaajan näkökulmasta lopullisella varmuudella.

Menettelyt eri urakoitsijoiden esittämien ratkaisujen teknisen laadun arvottamiseksi taikka urakan aikana tapahtuvien ratkaisumuutosten arvottamiseksi ovat kehitysvaiheessa. Eräs alustava ehdotus on liite 3.

## Kirjallisuus

Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Liikenneviraston ohjeita 35/2013. Liikennevirasto. Helsinki 2013.

Geolujitetut maarakenteet. Tiegeotekniikan käsikirja. Liikenneviraston oppaita 2/2012. Liikennevirasto. Helsinki 2012.

Geotekniset laskelmat. Tiehallinnon ohje. Helsinki 2003. TIEH 2100018-v-03.

Geotekniset tutkimukset ja mittaukset. Tiehallinnon ohje. Tiehallinto. Helsinki 2008. TIEH 2100057-08.

Juntunen, P. Elinkaarikustannukset ja painumariskit tien perustamistavan valinnassa. Tiehallinto. Helsinki 2004. TIEH 3200870.

Kalliokoski, A., Tolla, P., Valkeisenmäki, A. Elinkaarikustannuslaskennan käytön kehittäminen tienpidossa. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 3200670.

Kansallinen liite (LVM) SFS-EN 1997-1 Geotekninen suunnittelu. Yleiset säännöt: Soveltaminen infrarakenteisiin. LVM 32/2010. Liikenne- ja viestintäministeriö. Helsinki 2010.

Kevennysrakenteiden suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 5/2011. Liikennevirasto. Helsinki 2011.

Kähkönen, A, Nyby, M. Tieverkon elinkaarikustannusten hallinnan nykytila ja kehitystarpeet. Tiehallinto. Helsinki 2009. TIEH 4000728-v.

Lehmus, E., Eskola, P., Häkkinen, T., Korkiala-Tanttu, L., Mroueh, U-M., Tuhola, M. Infra-alan elinkaaritarkastelut. Esiselvitys. VTT. Espoo 2002. Sisäinen raportti RTE50-IR-22/2002.

Länsivaara, T. Painuman ennustaminen painumahavaintojen perusteella. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 3200695.

Maastotietojen hankinta – Toimintaohjeet. Liikenneviraston ohjeita 23/2011. Liikennevirasto. Helsinki 2011.

Massanvaihdon suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 11/2011. Liikennevirasto. Helsinki 2011.

Mroueh, U-M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Mäkelä, E., Juvankoski, M., Ruotoistenmäki, A. Life cycle assessment of road construction. Finnish National Road Administration. Helsinki 2000. TIEL 3200606E.

Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. Tielaitos. Helsinki 2000. TIEL 3200630.

Tammirinne, M. Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Tiehallinto. Helsinki 2002. TIEH 3200741.

Tien geotekninen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 10/2012. Liikennevirasto. Helsinki 2012.

Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla. Menetelmäkuvaus TPPT 19. Tiehallinto. Espoo 2001.

Tiepenkereiden ja leikkausten suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 9/2010. Liikennevirasto. Helsinki 2010.

Pohjarakentamisen kustannustietoja. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja. Tiehallinto. Helsinki 2002. TIEH 4000330.

Tiesuunnitelman kustannusarvioon ja vaihtoehtovertailuun sopivia yksikköhintoja. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja. Tiehallinto. Helsinki 2002. TIEH 4000305.

## Pohjarakennusmenetelmien elinkaarietodellisuuden vaikuttavia tekijöitä

Liittyy lukuun 3. Tarkoitus esittää hyvin yksinkertaistettu yhteenvedo menetelmän ominaisuuksista.

| Pohjarakennusmenetelmä         | Rakentamis-<br>kustannukset   | Rakentamisen<br>onnistuminen  | Tyypillisiä<br>mahdollisia<br>ympäristö-<br>vaikutuksia | Tyypillisiä<br>ympäristö-<br>kuormituksia                    | Työturvallisuuden<br>kannalta kriittistä  | Pitkäaikaiskestävyys  | Korjattavuus  |
|--------------------------------|---|---|---|--|---|---|---|
| <b>Paalulaattarakenteet</b>    | Yleensä suuret. Melko jyrkkä riippuvuus sekä pengerkorkeudesta että paalupituudesta | Yleensä onnistuu. Suoehmeiköt hankalimpia   | Tärinä, häiriintyminen                                  | Paalujen valmistus   | Paalujen/koneiden kaatuminen  | Yleensä hyvä. Jos vaurioituu, sortumavaara usein suuri            | Harvoin tarpeen korjata   |
| <b>Paaluhatturakenteet</b>     | Yleensä suuret. Jyrkkä riippuvuus paalupituudesta                                   | Nykyohjeiden mukaan ei käytetä suoehmeiköillä tms. joilla aikaisemmin epäonnistumisia | Tärinä, häiriintyminen                                  | Paalujen valmistus   | Paalujen/koneiden kaatuminen  | Yleensä hyvä. Jos vaurioituu, sortumavaara usein suuri            | Harvoin korjattavissa muuten kuin paalulaattarakenteella                      |
| <b>Massanvaihto kaivamalla</b> | Yleensä pienehköt. Jyrkkä riippuvuus pehmeikkösyvyydestä, ei pengerkorkeudesta      | Syvyyden kasvaessa tulee vaativammaksi  | Kaivuluisikan vakavuus                                  | Massojen kuljetus  | Luisien työaikainen vakavuus  | Hyvä  | Pienet jälkipainumat helposti korjattavissa                                   |
| <b>Pohjaantäyttö</b>           | Yleensä suuret. Jyrkkä riippuvuus pehmeikkösyvyydestä, ei pengerkorkeudesta.        | Vaatii taitoa   | Massojen sivusiirtymät                                  | Massojen kuljetus  | Täytön työaikainen vakavuus oltava alle 1, jolloin täytön liikkeet äkillisiäkin | Hyvä, jos työ on onnistunut                                       | Pienet jälkipainumat helposti korjattavissa, isommat joskus hyvinkin hankalia |
| <b>Syvästabilointi</b>         | Jyrkkä riippuvuus sekä pehmeikkösyvyydestä että pengerkorkeudesta                   | Yleensä onnistuu. Työn tasalaatuisuudessa ja laadunvalvonnassa kehittämisen varaa.    |   | Sideaineen valmistus   | Sideaineen pölyäminen   | Todennäköisesti hyvä.   | Ei juuri tarvittu korjata   |
| <b>Pystyjoitus</b>             | Yleensä huokeat   | Vaatii kuormitusaikaa. Liian hätäisesti kuormitetuista ikäviä kokemuksia.             |   | Ojanauhojen valmistus  |   | Herkkä lisäkuormituksille (lisäpäällystys, pohjaveden aleneminen) | Erittäin vaikeasti korjattava   |
| <b>Pengerkevennys</b>          | Jyrkkä riippuvuus pengerkorkeudesta ja pehmeiden kerrosten ominaisuuksista          | Silttimaalla mahdollista tarkkailumittauksin varmistaa mitoituksen oikeellisuus       |   | Kevennysmateriaalin valmistus ja usein pitkät kuljetusmatkat | Kaivantojen työturvallisuus   | Herkkä mitoitusvirheille ja esim. pohjaveden alenemalle           | Usein hankala korjattava  |



## Esimerkki pohjarakennusmenetelmän valinnasta

Liittyy lukuun 4 dokumentoituna käytännön esimerkkinä.

Kantatie 60 (nykyinen 46) välillä Heparo-Voikkaa, ramppi E1/R2  
Tie- ja rakennussuunnittelu 1985-88, rakentaminen 1990.

Olosuhteet:

- Pengerkorkeus 1...6 m.
- Pinnassa 2...4 m turvetta.
- Turpeen alla 3...6 m savea (su = 10...25 kPa, viimeksimainittu arvo tyypillisempi, pinnassa lujempi kerros).
- Saven alla 1...4 m hiekkaa tai moreenia.
- Korkean penkereen alueelle oli suunniteltu alikulkukäytävä (6 m aukko).

Korkean (yli n. 4 m) penkereen osuuksilla ratkaisu muotoutui seuraavasti:

- Riittävä vakavuus voitiin saavuttaa vain pengerpaalutuksella (paalupituus keskimäärin 11 m) tai pohjaantäytöllä (syvyys keskimäärin 7 m).
- Koska kyseessä oli suopehmeikkö, hylättiin paaluhatut ja katsottiin välttämättömäksi käyttää mahdollisen pengerpaalutuksen yhteydessä yhtenäistä paalulaattaa.
- Pohjaantäytössä katsottiin tarpeelliseksi käyttää täyttömateriaalina louhetta.
- Pohjaantäytön yhteydessä alikulkukäytävä tehtäisiin rengaskehänä, joka perustettaisiin yhtenäiselle laatalle. Pengerpaalutuksen yhteydessä myös ulokelaattasilta tulisi kysymykseen.
- Pohjaantäyttöön päädyttiin, koska se oli halvempi (pohjaantäyttö 1,0 milj. mk, pengerpaalutus 1,3 milj. mk, lisäksi pohjaantäytön yhteydessä käytettävä silta-tyyppi n. 0,3 milj. mk halvempi).

Matalamman penkereen osuuksilla ratkaisu muotoutui seuraavasti:

- Pengerpaalutus yhtenäistä laattaa käyttäen onnistuisi, mutta tavoitteeksi asetettiin löytää kustannuksiltaan edullisempi menetelmä.
- Turpeen varaan ei pystytty rakentamaan, koska vakavuuskin oli riittämätön, painumista puhumattakaan.
- Turpeen vahvistamiseen ei ollut menetelmää.
- Saven syvästabilointi ei suuren pengerkuorman takia ollut taloudellisesti kilpailukykyinen, saven melko hyvän luonnontilaisen lujuuden takia menetelmällä saavutettava hyöty olisi ollut tavallista vähäisempi ja menetelmään olisi liittynyt teknisiä erityispiirteitä ja hankaluuksia (hiekan läpäisy, laadunvalvonnan vaikeus jne.).
- Savikerroksen painumat olisivat kohtuulliset (200...500 mm) ja niistä ehtisi melko suuri osa tapahtua ensimmäisen 2,5 vuoden aikana ennen lopullista liikenteelle avaamista ja paksuhko penger- ja massanvaihtotäyttö tasoittaisi mahdollisia rampin pituussuuntaisia epätasaisuuksia.

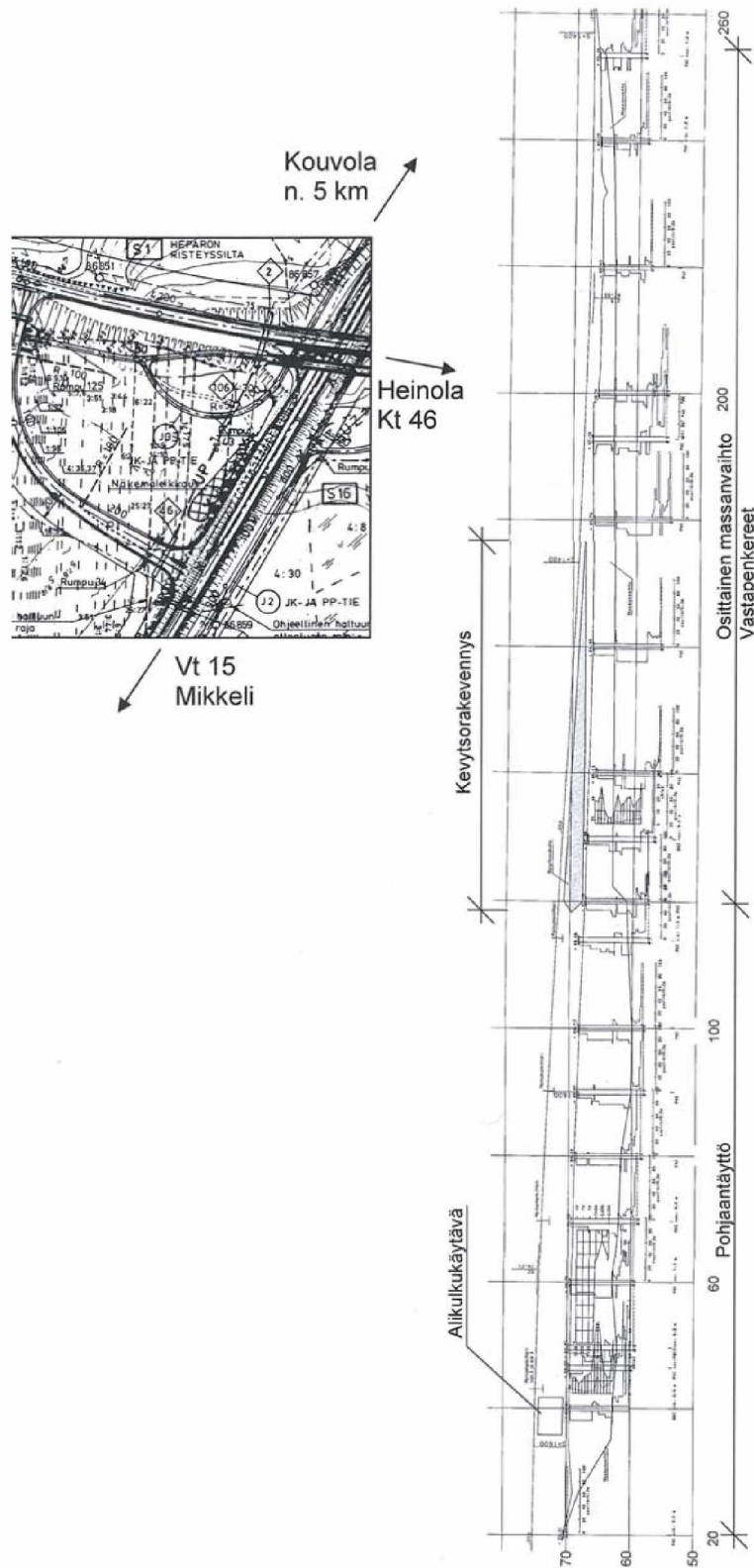
- 
- Edellä mainituista näkökohdista seurasi, että turpeen osalla tehtäisiin massanvaihto hiekalla varoen savikerroksen häiriintymistä. Vakavuutta piti vielä parantaa lisätoimenpitein
  - Vakavuuden parantamiseen voitaisiin käyttää vastapenkereitä, kevytsorakevennystä sekä lujitteita. Vastapenkereitä käytettäisiin mahdollisimman paljon, koska ne olivat halvin menetelmä. Kevytsoran ja lujitteiden tarve pyrittäisiin suunnittelussa minimoimaan.
  - Vastapenkereiden alta todettiin tarpeelliseksi kaivaa turve pois, jotta niiden toimivuus saatiin varmistetuksi.
  - Pohjaantäyttöosuuden pituutta kasvatettiin jonkin verran, koska vastapenkereiden alle laajennettu massanvaihto kavensi kustannuseroa pohjaantäyttöön nähden. Tällöin lujitteet jäivät tarpeettomiksi.
  - Ratkaisuksi tuli osittainen massanvaihto, vastapenkereet ja osittainen massanvaihto vastapenkereiden alla koko osuudella sekä lisäksi kevytsorakevennys sielä, missä pengerkorkeus ylitti 2 m.

Muita suunnittelutyön aikana esille tulleita näkökohtia:

- Rakentaminen alkaisi tästä rampista ja sitä käytettäisiin kiertotienä eritasoliittymän muun osan rakentamisen ajan.
- Louhemassoja ei ehdittäisi saada tielinjalta, mutta ne saataisiin kuitenkin suhteellisen edullisesti läheiseltä toiselta työmaalta.
- Kevytsoran kuljetusmatka Kuusankosken tehtaalta oli hyvin lyhyt.
- Vastapenger ramppisilmukan puolelle oli ilmainen ja toisellekin puolelle se järjestyi helposti.
- Yleensä oli melko hyviä kokemuksia vastaavanlaisista osittaisista massanvaihdosta, joissa turve kaivetaan pois ja hiekkatäyttö tehdään varovasti saven varaan.
- Siirtymä pohjaantäytöltä osittaiselle massanvaihdolle oli jonkin verran arveluttava, mutta jos pohjaantäytön tilalla olisi ollut paalulaatta, painumaero olisi ollut vielä vaikeammin vältettävissä.
- Tämän rampin osalta rakentaminen tapahtui tiepiirin omana työnä.

Rakentaminen onnistui ilman suuria vaikeuksia. Edelleen 2013 ratkaisu on selvästi onnistunut. Rampissa ei ole koko aikana havaittu liikenteelle haitallisia tai edes silmin erottuvia painumaepätasaisuuksia





Kuva

Kantatie 60 (nykyinen 46) välillä Heparo-Voikkaa, rampin E1/R2 kartta ja pituusleikkaus.



## Penkereen luokittaminen urakan hankintaa varten odotettavissa olevan painumatasaisuuden mukaan (liittyy lukuun 4)

Penkereen painumatasaisuuden luokituksella pyritään urakan hankinnassa yhdenvertaistamaan painumatasaisuudeltaan erilaiset pohjanvahvistusmenetelmät rakennuskustannusten ja tilaajan ylläpitokustannusten (painumien tasoittamiskustannusten) suhteen. Painumatasaisuudeltaan hyvä pengeri tuottaa urakoitsijalle korotusta maksettavaan urakkasummaan, koska painumantasaukustannuksia ei synny tien käyttöaika tai niitä syntyy hyvin vähän. Tie, jolle käyttöaikana syntyy painumia, on ylläpitokustannuksiltaan kalliimpi, joten rakentamisessa säästyneet kustannukset varataan tilaajalle tien painumien tasoittamiseen käytettäväksi. Lähtökohtana menettelyssä on, että urakoitsija voi valita pohjanvahvistusmenetelmän/perustamistavan laatimensa kustannuslaskelmien ja painumakehitysarvioiden perusteella. Tämä menettely soveltuu parhaiten urakoihin, joihin sisältyy suunnittelua (esim. ST-urakka) ja joiden takuu-aika on lyhyt (esim. 5 vuotta).

Pohjanvahvistusmenetelmät/pohjarakenteet on sijoitettu luokkiin teoreettisen painumatodennäköisyyden, penkereen pohjasuhteiden sekä yleisesti menetelmien käytökelpoisuudesta saatujen kokemusten perusteella.

### Luokituksen käyttö urakassa

Luokitusta käytetään urakoiden arvioinnissa. Tiesuunnitelmassa, joka sisältyy tarjouspyyntöasiakirjoihin, esitetään jokaiselle pehmeikölle pohjanvahvistustapa (pohjarakenne) ja tämän perusteella määritellään kullekin penkereelle painumatasaisuuden luokka. Urakoitsija voi kuitenkin valita pohjanvahvistusmenetelmän/pohjarakenteen vapaasti. Jos urakoitsija tekee eriluokkaisen pohjanvahvistuksen kuin tiesuunnitelmassa on esitetty, muutetaan urakoitsijalle maksettavaa urakkasummaa sen mukaan miten muutos vaikuttaa tien rakentamisen jälkeisiin ylläpitokustannuksiin. Jos urakoitsija korottaa tiesuunnitelman pohjanvahvistusluokan (esimerkiksi C:stä B:hen), korotetaan urakoitsijalle maksettavaa urakkasummaa. Jos urakoitsija alentaa luokkaa, vähennetään urakkasummaa. Korotusten ja vähennysten määrät kussakin yksittäisessä tapauksessa annetaan jo tarjouspyynnössä tiedoksi.

Urakkasumman korotukset/vähennykset liittyvät elinkaarikustannusten tasaamiseen. Urakoitsijalle mahdollisesti koituvat arvovähennykset lasketaan erikseen ja niissä noudatetaan jo käytössä olevia periaatteita. Urakoitsija joutuu maksamaan arvovähennyistä tai korjaamaan rakenteen seuraavissa tapauksissa ja perusteet määritellään tarjouspyyntöasiakirjoissa:

- kun luokan A mukaan rakennetussa penkereessä tapahtuu painumaa (käytännön raja-arvo voitaneen asettaa 20–30 mm:ksi)
- kun luokan B mukaan rakennetussa penkereessä tapahtuva painuma on yli 100 mm tai painuma jatkuu 5 vuoden jälkeen
- kun luokan C mukaan rakennetussa penkereessä tapahtuva painuma on suurempi kuin ohjeessa Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet tai tarjouspyyntöasiakirjoissa on sanottu

- riippumatta painumasta aina kun rakenne (esim. paalulaatta) on virheellisesti tehty, taikka rakenne vahingoittuu penkereen painumisen johdosta riippumatta siitä, kuinka pieni tämä painuma on.

| Pengerluokka  | Penger/Penkereen pohjavahvistus/pohjarakenne  |
|---|---|
| <p><b>Pengerluokka A "painumaton"</b><br/>Tasaisuus käyttöaikana on erinomainen ja riski ratkaisun onnistumisen suhteen on pieni. Rakennusaikana penger saa painua vähän.</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• paalulaatta (tuki- tai kitkapaalut materiaalina teräsbetoni tai teräs, ei puu)</li> <li>• massanvaihto kaivaen (syvyys enintään 5 m)</li> <li>• maanvarainen karkearakeiselle pohjamaalle</li> </ul>   |
| <p><b>Pengerluokka B "vähän painuva"</b><br/>Tasaisuus käyttöaikana on hyvä. Vähäistä painumista (alle 100 mm) saa esiintyä käyttöajan alussa (alle 5 v). Ratkaisun onnistumisluotettavuus on suhteellisen hyvä.</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• paaluhatturakenne</li> <li>• massanvaihto kaivaen (syvyys &gt; 5 metriä)</li> <li>• massanvaihto pohjaan täyttäen</li> <li>• syvästabilointi painumattomaan kerrokseen ulottuvia, kimmoisia pilareita käyttäen</li> <li>• massasyvästabilointi (syvyys enintään 5 metriä, ei turve eikä lieju)</li> <li>• syvästabilointi, myötäävät pilarit</li> <li>• muut pohjavahvistetut (esim. pystyojitettu, lujitteilla vahvistettu, kevennetty, esikuormitettu, määrämittaisilla pilareilla syvästabiloitu) penkereet silttipehmeiköllä tai savipehmeiköllä, jonka saven leikkauslujuus on vähintään 50 kPa tai jonka savikerroksen paksuus on enintään 3 m.</li> </ul> |
| <p><b>Pengerluokka C "painuva"</b><br/>Tasaisuus käyttöaikana on tyydyttävä ja täyttää ne vaatimukset, jotka Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperuste -ohjeessa on asetettu. Geoteknisten painumalaskelmien luotettavuus on yleensä vain välttävä hyvälläkin suunnittelulla</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• muut kuin kohdassa A tai B mainitut pohjavahvistetut (esim. pystyojitettu, lujitteilla vahvistettu, kevennetty, esikuormitettu, määrämittaisilla pilareilla syvästabiloitu) penkereet savipehmeiköllä, jonka saven leikkauslujuus on enintään 50 kPa tai jonka savikerroksen paksuus on vähintään 3 m.</li> </ul>  |



